



TUGAS AKHIR - TM 091486

**PERANCANGAN FLYWHEEL UNTUK SISTEM HYBRID
PADA ATC BUS TRANS JAKARTA BERDASARKAN
MODEL DINAMIKA LONGITUDINAL KENDARAAN
YANG MENYERTAKAN INTERAKSI PENGEMUDI
KENDARAAN DRIVING CYCLE PULAU GADUNG -
MONAS CB**

HADID BISMARA TEDJI
NRP. 2109100033

Dosen Pembimbing
YOHANES ST. MSc.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM 091486

**FLYWHEEL DESIGN FOR A HYBRID SYSTEM ON A
ATC TRANS JAKARTA BUS BASED ON
LONGITUDINAL VEHICLE DYNAMIC MODEL WITH
THE INTERACTION OF THE DRIVER ON A
PULOGADUNG - MONAS CB DRIVING CYCLE.**

HADID BISMARA TEDJI
NRP. 2109100033

Acedemis Supervisor
YOHANES ST. MSc.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Tchnology
Surabaya 2014

**PERANCANGAN FLYWHEEL UNTUK SISTEM HYBRID
PADA ATC BUS TRANS JAKARTA BERDASARKAN
MODEL DINAMIKA LONGITUDINAL KENDARAAN
YANG MENYERTAKAN INTERAKSI PENGEMUDI
KENDARAAN DRIVING CYCLE PULAU GADUNG –
MONAS CB**

Nama Mahasiswa : Hadid Bismara Tedji
NRP : 2109 100 033
Jurusan : S1 Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Yohanes, ST. MSc.

ABSTRAK

Bus trans jakarata merupakan sebuah bus yang beroperasi pada sistem transportasi Bus Rapid Transit (BRT) di Jakarta. Bus Transjakarta ini beroperasi dengan menurunkan dan mengangkut penumpang pada halte-halte yang telah disediakan. Karena Bus trans Jakarta ini harus berhenti di setiap halte ini maka dalam pengoperasiannya akan banyak melakukan perlambatan dan percepatan dengan massa yang sangat besar. Dari sana dapat diasumsikan bahwa kendaraan Bus Trans Jakarta ini akan membutuhkan daya yang besar. Maka diperlukan sebuah sistem yang dapat membantu kinerja engine Bus Trans Jakarta dalam menghasilkan daya agar kendaraan dapat berjalan dengan driving cycle Pulogadung – Monas CB tanpa adanya keterlambatan.

Tujuan Tugas akhir ini untuk membuat model kendaraan Bus Transjakarta dengan sistem Flywheel hybrid yang dapat membantu kinerja engine Bus Transjakarta agar kendaraan dapat berjalan dengan driving cycle Pulogadung – Monas CB tanpa adanya keterlambatan. Pada tugas akhir ini dibuat sebuah pemodelan dinamika Bus Trans Jakarta ke arah longitudinal dengan interaksi pengemudi melalui bukaan throttle dan pemindahan rasio transmisi pada driving cycle Pulogadung – Monas CB. Setelah membuat model dinamika kendaraan

dirancang dimensi flywheel hybrid yang digunakan untuk energy storage sistem pada sistem hybrid. Kemudian membuat pemodelan Bus Transjakarta yang dilengkapi dengan Flywheel hybrid sistem.

Hasil yang didapatkan dari tugas akhir ini didapatkan dari pemodelan dinamika Bus Trans Jakarta dengan interaksi pengemudi pada driving cycle Pulogadung – Monas CB berupa daya terbesar driving cycle sebesar 519.6 kW saat akselerasi. Dari daya driving cycle maksimum digunakan untuk merancang flywheel. Pada kondisi bukaan throttle 0-100 % flywheel bermassa 111.34 Kg, pada kondisi bukaan throttle 0-50 % flywheel bermassa 179.1 Kg dan pada kondisi bukaan throttle khusus flywheel bermassa 129.82 Kg. Ditinjau dari massa , jumlah charging dan discharging serta konsumsi bahan bakar maka dipilih kondisi bukaan throttle khusus. Pada kondisi throttle khusus ini memiliki flywheel dengan massa 129.82 Kg, jumlah charging sebanyak 2 kali dan jumlah discharging 28 kali serta memiliki konsumsi bahan bakar 9.041 Km/liter.

Kata kunci: Bus Hybrid, Flywheel, Driving cycle, Pemodelan,

**FLYWHEEL DESIGN FOR A HYBRID SYSTEM ON A
ATC TRANS JAKARTA BUS BASED ON
LONGITUDINAL VEHICLE DYNAMIC MODEL WITH
THE INTERACTION OF THE DRIVER ON A
PULOGADUNG – MONAS CB DRIVING CYCLE.**

Name : HadidBismaraTedji
NRP : 2109 100 033
Department : S1TeknikMesin FTI-ITS
Advisor Lecture : Yohanes, ST. MSc.

ABSTRAK

Trans Jakarta Bus is a Bus Rapid Transportation system in Jakarta. Trans Jakarta bus operated by lowering and picking up passenger on the provided station. Because of trans Jakarta bus stop and go motion at each station it will accelerate and decelerate with a large mass. We can assume that that trans Jakarta bus will require a large power. A system that can help the vehicles engine in order to generate power is needed. This system will help the vehicle to run at Pulogadung- Monas BC driving cycle.

The purpose of this final project is to create a model of trans Jakarta buse with a flywheel hybrid system that can help the vehicle run at Pulogadung – Monas CB driving cycle without any delay. In this final project start by modeling alongitudinal vehicle with the driver interaction via throttle level and gear shift raion on Pulogadung – Monas CB driving cycle, from the modeling dat is used to design flywheel hybrid dimension. Flywheel is used to store energy in a flywheel hybrid system

The result of this final project is, drom the trans Jakarta bus longitudinal modeling eith the interaction of the driver via throttle level dan gear shift ratio on Pulogadung – Monas CB driving cycle is the maximum driving cycle power is 519.6 kW during acceleration. From the driving cycle maximum power it is used to design a flywheel. A 0-100 % throttle level condition the

flywheel is 111.34 Kg, for a 0-50 % throttle level condition the flywheel is 179.1 Kg and for a special throttle level the flywheel is 129.82 Kg. In terms of mass, the number of charging and discharging as well as fuel consumption then selected the special throttle level condition. at tis special throttle level condition the flywheel is 129,82Kg, 2 times of charging and 28 times for discharging and have fuel consumption of 9.9 Km/Liter.

Key Words: Driving cycle, Flywheel, Hybrid Bus, Modeling

**PERANCANGAN FLYWHEEL UNTUK SYSTEM
HYBRID PADA ATC BUS TRANS JAKARTA
BERDASARKAN MODEL DINAMIKA
LONGITUDINAL KENDARAAN YANG
MENYERTAKAN INTERAKSI PENGEMUDI
BERDASARKAN DRIVING CYCLE PULOGADUNG
– MONAS CB**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Desain
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh :

Hadid Bismara Tedji
Nrp. 2109 100 033

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Yohanes ST. MSc. (Pembimbing)
NIP. 198006272012121003
2. Ir. Yusuf Kaelani, M.Eng (Penguji I)
NIP. 196511031990021001
3. Dr. Ir. Agus Sigit Pranomo, DEA (Penguji II)
NIP. 196508101991021001
4. Alief Wikarta, ST.MSc. Eng. PhD (Penguji III)
NIP. 198202102006041002

SURABAYA
Januari, 2014

KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum Warohmatulloh Wabarokatuh

Alhamdulillah, puji syukur hanya layak dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunanNya lah penulis akhirnya bisa menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

“PERANCANGAN FLYWHEEL UNTUK SISTEM HYBRID PADA ATC BUS TRANS JAKARTA BERDASARKAN MODEL DINAMIKA LONGITUDINAL KENDARAAN YANG MENYERTAKAN INTERAKSI PENGEMUDI KENDARAAN DRIVING CYCLE PULAU GADUNG – MONAS CB”

Tak lupa shalawat serta salam untuk Nabi Muhammad SAW. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari Lukman Tedji dan Erna Swadesi yang telah menjadi orang tua terbaik dalam hidup penulis, yang selalu memberikan do'a dan dorongan dalam segala kondisi.

Surabaya, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

Judul	
Lembar Pengesahan	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Tugas Akhir	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Manfaat Tugas Akhir	3
1.6. Sistematika Laporan.....	3

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1. Kajian terdahulu	5
2.1.1 Penelitian terdahulu	5
2.1.2 Gyrobus	7
2.2. Dasar teori	8
2.2.1 Kendaraan hybrid	8
2.2.1.1 Sistem hybrid flywheel	8
2.2.1.1.1 Charging flywheel.....	9
2.2.1.1.2 Direct engine	10
2.2.1.1.3 Discharge.....	11
2.2.2 Flywheel	12
2.2.3 Dinamika Kendaraan	17
2.2.3.1 Traksi Kendaraan	17
2.2.3.2 Akselerasi Kendaraan.....	18
2.2.3.3 Kondisi Kecepatan Konstan	19

2.2.3.4 Kondisi Deselerasi	19
2.2.4 Sistem Transmisi Kendaraan.....	19
2.2.5 Trans Jakarta	20
2.2.6 Simulink Matlab.....	23

BAB III METODOLOGI

3.1. Metodologi Penelitian.....	25
3.2. Observasi Lapangan	26
3.2.1 Data ATC Bus Trans Jakarta.....	26
3.2.2. Data Transmisi ATC Bus Trans Jakarta.....	27
3.2.3 Data engine ATC Bus Trans Jakarta	27
3.3. Identifikasi Masalah	28
3.4. Studi Literatur	29
3.5. Pemodelan Dinamika Bus Trans Jakarta Dengan Interaksi Pengemudi.....	29
3.5.1 Pemodelan Gaya Resistansi.....	31
3.5.2 Pemodelan Torsi dan Putaran pada Roda.....	33
3.5.3 Pemodelan Drive Train	34
3.5.4 Pemodelan Internal Combustion Engine.....	35
3.5.5 Pemodelan Interaksi Pengemudi	37
3.5.5.1 Pemodelan Gear Shift Logic	38
3.5.5.2 Pemodelan Throttle Level Logic.....	41
3.6. Analisa Daya	44
3.7. Perancangan Flywheel Hybrid	45
3.8. Pemodelan Flywheel Hybrid Sistem Pada Bus Trans Jakarta	47
3.9. Flywheel Dapat Memenuhi Kebutuhan Daya Kendaraan	49
3.10. Analisa	50
3.11. Kesimpulan.....	50

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil dan Analisa Kebutuhan Daya Dorong	51
4.1.1 Hasil Kebutuhan Daya Dorong pada Pemodelan Dinamika Kendaraan	51
4.1.2 Analisa kebutuhan Daya Dorong pada Pemodelan Dinamika Kendaraan	54
4.2 Perancangan Flywheel Hybrid	55
4.3 Hasil dan Analisa Flywheel Hybrid sebagai Penyimpan Daya	61
4.3.1.1 Hasil Flywheel Hybrid sebagai Penyimpan Daya pada Throttle 100 Persen	61
4.3.1.2 Hasil Flywheel Hybrid sebagai Penyimpan Daya pada Throttle 50 Persen	65
4.3.1.3 Hasil Flywheel Hybrid sebagai Penyimpan Daya pada Throttle Level Khusus	71
4.3.2 Analisa Flywheel Hybrid sebagai Penyimpan Daya	77

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	82

DAFTAR PUSTAKA	83
----------------------	----

LAMPIRAN

TERIMA KASIH

BIOGRAFI PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Grafik Power Density dan Energy Density	6
Gambar 2.2 Gyrobus saat Beroperasi di Swiss	7
Gambar 2.3 Konstruksi Flywheel Hybrid pada Bus Trans Jakarta	9
Gambar 2.4 Aliran Daya pada Saat Mode Charging dari Engine ke Flywheel.....	10
Gambar 2.5 Aliran Daya pada Mode Direct Engine	11
Gambar 2.6 Aliran Daya pada Mode Discharge	12
Gambar 2.7 Gaya yang Bekerja pada Cylinder yang Berputar	14
Gambar 2.8 Dinamika Kendaraan	17
Gambar 2.9 Gambar Drive Train Kendaraan	20
Gambar 2.10 Kendaraan Bus Trans Jakarta	21
Gambar 2.11 Library Browser.....	23
Gambar 2.12 Contoh Blok Simulink.....	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir Secara Global	25
Gambar 3.2 Data Engine pada ATC Bus Trans Jakarta	27
Gambar 3.3 Grafik Torsi vs Putaran dengan Variasi Buka-an Throttle	28
Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Dinamika Bus Trans Jakarta dengan Interaksi Pengemudi.....	30
Gambar 3.5 Model Dinamika Bus Trans Jakarta dengan Interaksi Pengemudi pada Matlab Simulink.....	31
Gambar 3.6 Model Gaya Resistansi pada Matlab Simulink.....	32
Gambar 3.7 Model Torsi dan Putaran Roda pada Matlab Simulink.....	33
Gambar 3.8 Model Drive Train pada Matlab Simulink	35
Gambar 3.9 Model Internal Combustion Engine pada Matlab Simulink.....	37
Gambar 3.10 Model Interaksi Pengemudi pada Matlab Simulink	38
Gambar 3.11 Diagram Alir Gear Shift Logic.....	39

Gambar 3.12 Diagram Gear Shift Logic dalam Matlab Stateflow	41
Gambar 3.13 Diagram Alir Throttle Level Logic	42
Gambar 3.14 Diagram Throttle Level Logic pada Matlab Simulink	43
Gambar 3.15 Daya Driving Cycle dan Daya Engine	44
Gambar 3.16 Dimensi Rancangan Flywheel Hybrid.....	46
Gambar 3.17 Model Perancangan Flywheel pada Matlab Simulink	46
Gambar 3.18 Model flywheel Hybrid System pada Matlab Simulink	48
Gambar 3.19 Model Mode Operasi Flywheel Hybrid system pada Matlab Simulink	48
Gambar 3.20 Model <i>Flywheel</i> pada Matlab Simulink.....	50
Gambar 4.1 Driving Cycle Pulogadung – Monas CB	52
Gambar 4.2 Grafik Kebutuhan Daya Driving Cycle dan Daya Engine pada Massa Kosong.....	53
Gambar 4.3 Grafik Kebutuhan Daya Driving Cycle dan Daya Engine pada Massa Penuh	54
Gambar 4.4 Daya driving Cycle Maksimal dan Daya Engine Maksimal pada Detik 3050	56
Gambar 4.5 Dimensi Flywheel Hybrid	58
Gambar 4.6 Grafik Kebutuhan Daya Driving Cycle dan Daya Engine dengan Throttle 0-100 Persen.....	62
Gambar 4.7 Putaran Flywheel Setiap saat pada Pemodelan Dinamika Kendaraan dengan Throttle 0-100 Persen.....	62
Gambar 4.8 Grafik Operasi Clutch 1 dan 2 pada Flywheel Hybrid Sistem pada Pemodelan Throttle 100 Persen.....	63
Gambar 4.9 Grafik Absolute Fuel Consumption pada Pemodelan Throttle 0-100 persen	64
Gambar 4.10 Grafik Kebutuhan Daya Driving Cycle dan Daya Engine pada Throttle Level 0-50 Persen	66

Gambar 4.11 Grafik Daya Driving Cycle dan Daya Engine pada Throttle 0-50 Persen	68
Gambar 4.12 Putaran Flywheel Setiap saat dengan Pemodelan Throttle 0-50 Persen	68
Gambar 4.13 Grafik operasi clutch 1 dan clutch 2 pada flywheel hybrid sistem dengan throttle level 0-50 persen..	69
Gambar 4.13 Grafik Operasi Clutch 1 dan Clutch 2 pada Flywheel Hybrid Sistem dengan Throttle Level 0-50 Persen	70
Gambar 4.14 Grafik Absolute Fuel Consumption pada Pemodelan Throttle 0-50 Persen	70
Gambar 4.15 Grafik Daya Driving Cycle dan Daya Engine pada Throttle Level Khusus	72
Gambar 4.16 Grafik Daya Driving Cycle dan Daya Engine pada Throttle Level Khusus	74
Gambar 4.17 Putaran Flywheel Setiap Saat, pada Throttle Level Khusus	74
Gambar 4.18 Grafik Operasi Clutch 1 dan 2 pada Flywheel Hybrid Sistem dengan Throttle Level Khusus	75
Gambar 4.19 Grafik Absolute Fuel Consumption pada Throttle Level Khusus	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Waktu Tempuh dan Kecepatan Perjalanan Halte Pulogaung – Halte Asmi	22
Tabel 3.1 Tabel Mode pada <i>Flywheel hybrid System</i> pada Bus Trans Jakarta	47
Tabel 4.1 Tabel Hasil Simulasi Pemodelan Dinamika Kendaraan	77

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jakarta adalah kota dengan kepadatan nomor 7 dunia dengan kepadatan 15400 penduduk per kilometer persegi. Kepadatan penduduk di dalam kota ini tentunya akan menimbulkan kemacetan lalu lintas. Maka pemerintah kota Jakarta membuat sebuah *system* transportasi *Bus Rapid Transit* (BRT) yang dinamai Trans Jakarta.

Trans Jakarta ini beroperasi dengan menurunkan dan mengangkut penumpang pada halte-halte yang telah disediakan. Karena Bus trans Jakarta ini harus berhenti di setiap halte ini maka dalam pengoperasiannya akan banyak melakukan perlambatan dan percepatan dengan massa yang sangat besar. Dari sana dapat diasumsikan bahwa kendaraan Bus Trans Jakarta ini akan memerlukan daya yang besar. Untuk sebuah kendaraan dengan jumlah penumpang 350.000 per hari ini maka massa bus trans Jakarta pada saat berkapasitas penuh ini akan memiliki masa yang besar dan membutuhkan daya yang besar. Maka diperlukan sebuah teknologi yang dapat membantu kinerja *engine* untuk menghasilkan daya.

Hybrid merupakan sebuah teknologi yang dapat mengurangi konsumsi bahan bakar kendaraan, dengan menggunakan dua atau lebih sumber penggerak. *Hybrid* yang banyak digunakan saat ini adalah *Hybrid* elektrik dengan menggunakan baterai kimia. Namun teknologi baterai ini memiliki keterbatasan seperti daya yang tidak terlalu besar dan memiliki ongkos produksi yang mahal. *Flywheel* merupakan salah bentuk penyimpanan energi yang biasanya digunakan pada *system* piston. Pada *flywheel* jika dimesninya disesuaikan maka dapat digunakan sebagai penyimpan energi untuk sebuah *system Hybrid*. *Flywheel* ini sendiri memiliki ongkos produksi yang cukup murah, namun untuk mengaplikasikan teknologi ini memerlukan biaya yang besar. Oleh karena itu digunakan sebuah

bentuk pemodelan untuk mengetahui apakah sebuah *system Hybrid flywheel* ini dapat digunakan dalam kendaraan bus Trans Jakarta.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang terdapat dalam tugas akhir ini adalah bagaimana merancang *flywheel* yang mencukupi kebutuhan daya dorong Bus ATC Trans Jakarta agar dapat berjalan sesuai *driving cycle* Pulogadung – Monas CB dengan muatan penuh tanpa adanya keterlambatan.

1.3. Tujuan Tugas Akhir

Dengan mengacu pada perumusan masalah di atas, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah mendapatkan rancangan *flywheel* yang dapat mencukupi kebutuhan daya dorong Bus Trans Jakarta agar dapat berjalan sesuai *driving cycle* Pulogadung – Monas CB dengan muatan penuh tanpa adanya keterlambatan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan yang digunakan di dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan kendaraan *relative* terhadap kecepatan kendaraan angin sama dengan kecepatan kendaraan.
2. Laju perubahan kecepatan pada *driving cycle* diasumsikan konstan.
3. Untuk setiap tingkat transmisi nilai koefisien inersia berputar konstan.
4. Efisiensi setiap komponen 100%.
5. Kendaraan bergerak dengan kecepatan yang sesuai dengan *driving cycle* Trans Jakarta.
6. Kendaraan berjalan pada jalan lurus tanpa adanya gradient tanjakan.
7. Radius dinamik ban kendaraan kendaraan dianggap konstan.
8. Pemodelan tidak menyertakan *regenerative braking*.

9. Kendaraan selalu dalam keadaan *Under Power*.
10. Kinerja *Engine* tidak pengaruh kondisi lingkungan sekitar.

1.5. Manfaat Tugas Akhir

Tugas akhir ini memiliki manfaat antara lain.

1. Membantu pendesainan *Flywheel Hybrid* pada kendaraan Bus Trans Jakarta dengan memodelkan terlebih dahulu kendaraan.
2. Menjadi acuan bagi penelitian yang lebih mendalam di kemudian hari.

1.6. Sistematika Laporan

Sistematika penulisan dibagi dalam beberapa bab sebagai berikut:

1. Bab 1 Pendahuluan, bab ini berisi latar belakang dari penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat, dan sistematika penulisan laporan.
2. Bab 2 Dasar Kajian Pustaka, bab ini berisi dasar – dasar ilmu yang mendukung pengerjaan tugas akhir.
3. Bab 3 Metodologi, bab ini berisi urutan langkah – langkah pemodelan *Hybrid Flywheel* sistem.
4. Bab 4 Hasil dan Analisa, pada bab ini membahas hasil dari pemodelan *Flywheel Hybrid* kendaraan Bus Trans Jakarta
5. Bab 5 Kesimpulan dan Saran, berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran – saran untuk membuat penelitian ini lebih baik.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

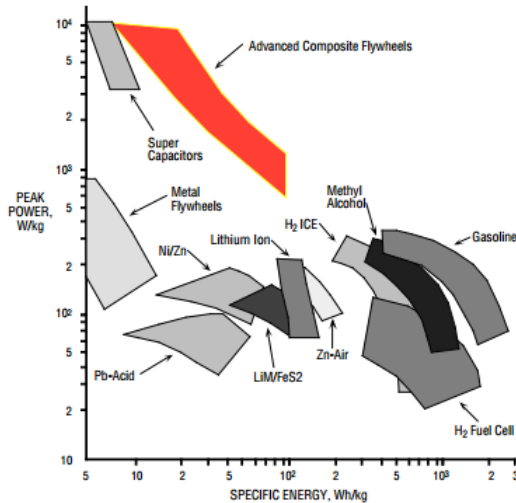
1.1 Kajian Terdahulu

2.1.1 Penelitian terdahulu

Wang, Luo dan Zhang (2008) melakukan sebuah penelitian dengan membuat sebuah pemodelan sebuah Bus kota yang beroperasi dengan *driving cycle* kota wuhan cina. Pada penelitian ini dibahas bagaimana membuat sebuah pemodelan kendaraan berdasarkan *driving cycle* yang telah ditentukan. Wang membuat pemodelan dengan menghitung berapa kebutuhan gaya kendaraan untuk bergerak pada *driving cycle* wuhan. Kemudian akan didapatkan kebutuhan torsi untuk menggerakkan kendaraan setiap saat. Selain dari penelitian ini juga didapatkan bagaimana konsumsi bahan bakar kendaraan pada saat melewati *driving cycle* tersebut.

D. Cross dan J. Hilton melakukan sebuah penelitian dengan membuat sebuah kendaraan *flywheel hybrid*. Pada penelitian ini dibahas sebuah *flywheel* sebagai *energy storage system* pada sebuah kendaraan *hybrid*, penggunaan *flywheel* sebagai energi storage system ini karena memiliki potensi daya yang besar dibandingkan potensi daya yang dimiliki oleh baterai kimia yang banyak digunakan. Cross melakukan perhitungan energi yang didapatkan dan disimpan saat kendaraan melakukan perlambatan pada *driving cycle* amerika US-FTP75. *Driving cycle* US-FTP 75 memiliki kecenderungan untuk melakukan perlambatan dalam waktu yang sangat singkat. Waktu yang singkat ini cocok untuk sebuah *energy storage system* yang dapat melakukan *Charging* dalam waktu singkat. Pada kendaraan *hybrid* saat ini banyak menggunakan baterai kimia berupa Nickel metal hydride (NiMH) dan mobil *hybrid* masa depan akan diprediksikan menggunakan baterai kimia Lithium Ion (Li-Ion). Baterai kimia ini memiliki beberapa kekurangan seperti memiliki kemampuan melepaskan dan menyimpan energi per berat yang tidak terlalu besar atau dapat disebut dengan *power density*.

Namun baterai kimia ini memiliki kemampuan menyimpan energi yang besar per berat atau disebut energi *density*. Dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.1 Grafik *Power Density* dan *Energy Density*

Dari grafik di atas maka dapat dilihat bahwa baterai kimia ini memiliki energi *density* yang besar namun memiliki *power density* yang tidak terlalu besar. Ini akan menjadi jika *system hybrid* membutuhkan daya yang besar. Untuk kendaraan *hybrid* pribadi yang banyak digunakan adalah kendaraan yang kecil dan membutuhkan daya yang tidak terlalu besar selain itu baterai kimia ini memiliki ongkos produksi yang cukup mahal. Untuk sebuah kendaraan transportasi massal seperti Bus Trans Jakarta diperlukan suatu baterai yang dapat menyimpan dan melepaskan daya yang besar. Maka dari gambar di atas salah satu yang memiliki *power density* yang besar adalah *advance composite Flywheel*, *advance composite flywheel* ini adalah *flywheel* yang dapat berputar dengan kecepatan hingga 65000 RPM. Untuk tugas akhir kali ini akan digunakan metal *flywheel*, namun tetap

memiliki *power density* yang cukup besar dan ongkos produksi yang jauh lebih murah dari pada baterai kimia.

2.1.2 Gyrobus

Kendaraan Bus *flywheel* sebenarnya bukan hal yang baru. Pada tahun 1950 sebuah Bus transportasi massal yang menggunakan *Flywheel* sebagai penyimpanan energinya disebut Gyrobus. Gyrobus ini adalah bus bertenaga listrik dengan motor penggerak dan generator untuk disimpan di dalam *flywheel*. Untuk dapat beroperasi gyrobus ini menggunakan *Flywheel* berukuran 3 ton. Ini menimbulkan berbagai masalah dalam pengoprasian gyrobus.



Gambar 2.2 Gyrobus saat Beroperasi di Swiss

Dalam tugas akhir kali ini akan dibahas sebuah kendaraan Bus *Flywheel hybrid* dengan bantuan *engine* diesel sebagai sumber utama *power train*. Saat *engine* bekerja maka akan menghasilkan daya untuk menggerakkan kendaraan. Namun daya yang dihasilkan oleh *engine* ini sebenarnya melebihi kebutuhan daya untuk menggerakkan kendaraan, daya sisa ini akan disimpan dalam *flywheel* untuk digunakan saat kendaraan membutuhkan daya. Untuk melepaskan daya ini kepada kendaraan dibutuhkan suatu *system* CVT.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kendaraan hybrid

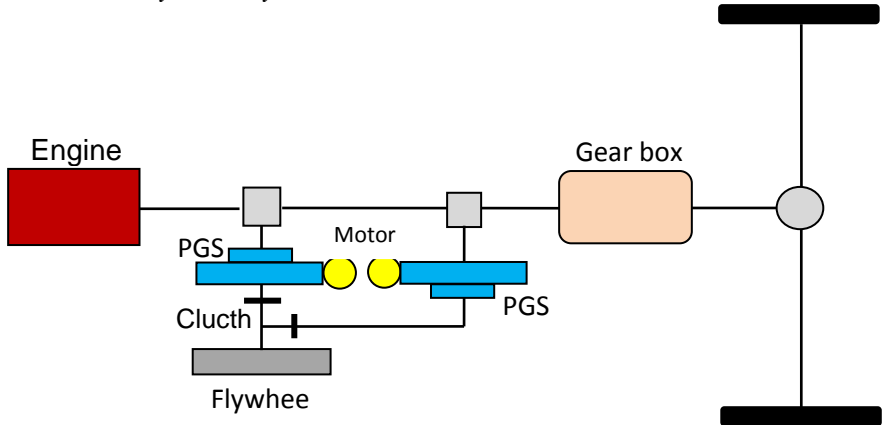
Hybrid adalah sebuah kendaraan yang memiliki 2 atau lebih sumber penggerak kendaraan. Sebuah *hybrid system* kendaraan memiliki 2 komponen utama, yang pertama adalah tempat penyimpanan energy seperti baterai dan sebuah alat untuk mentransfer energi listrik tersebut menjadi energi kinetis yang dapat menggerakkan kendaraan seperti motor listrik. Motor listrik ini juga digunakan untuk merubah energi kinetis menjadi energi listrik. Energi listrik ini kemudian akan disimpan dalam baterai yang kemudian akan diubah menjadi energy kimia potensial.

Alternative energy tersedia untuk alat seperti baterai dan motor listrik. Dalam bentuk mekanis, energy kinetis kendaraan dapat disimpan dalam di dalam putaran *flywheel*. Sebuah *system* CVT digunakan untuk mentransfer energy secara kontiniu dengan menyamakan putaran *flywheel* dan putaran *engine* kendaraan. Penyimpanan dan pelepasan *energy* dilakukan dengan mengatur ratio antara *flywheel* dan putaran *engine*. Mempercepat *flywheel* akan menyimpan energi dan memperlambat *flywheel* akan menyebabkan *flywheel* untuk melepaskan energi kepada kendaraan. Ini adalah transfer energi momentum.

2.2.1.1 Sistem *hybrid flywheel*.

Pada *system flywheel hybrid* ini untuk melepaskan energi dari *engine* ke *flywheel* dan melepaskan energi dari *flywheel* ke

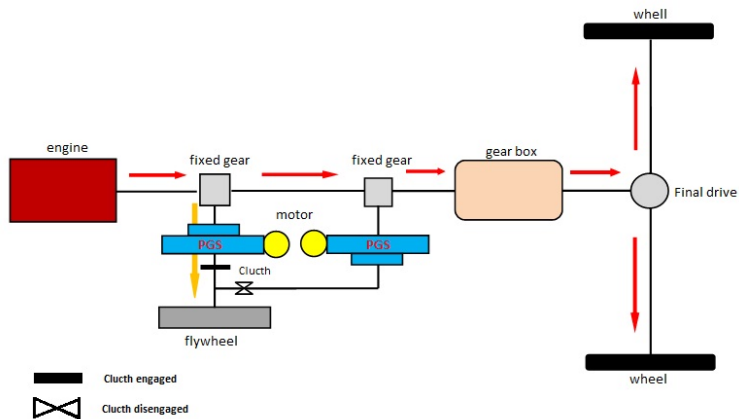
kendaraan untuk membantu kerja *engine* digunakan *system* CVT yang dapat merubah rasio untuk menyamakan putaran *flywheel* dan putaran *engine*. Gambar 2.3 adalah gambar konstruksi kendaraan *Flywheel hybrid*.



Gambar 2.3 Konstruksi *Flywheel Hybrid* pada Bus Trans Jakarta

2.2.1.1.1 *Charging flywheel.*

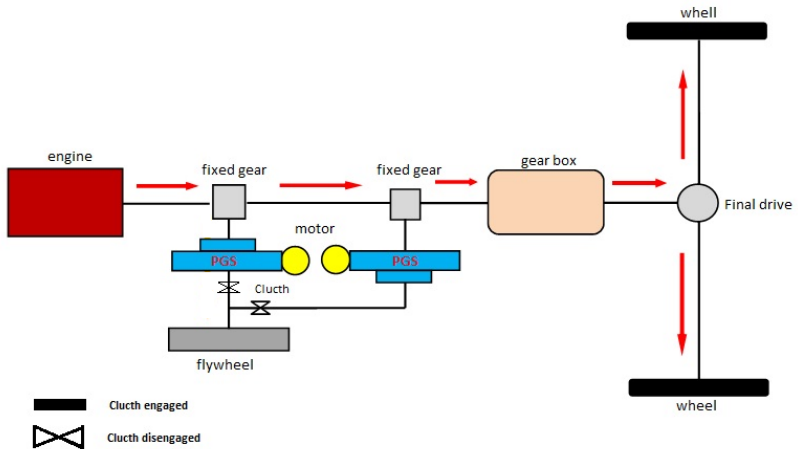
Pada mode *Charging* ini dilakukan pada saat $P_e > P_d$, dimana daya yang dihasilkan oleh *engine* lebih besar daripada daya yang dibutuhkan oleh kendaraan artinya *engine* dapat memenuhi kebutuhan daya kendaraan dan masih memiliki daya berlebih. Daya berlebih ini akan digunakan untuk *Charging flywheel*, aliran daya digambarkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Aliran Daya pada Saat Mode *Charging* dari *Engine* ke *Flywheel*.

2.2.1.1.2 *Direct engine*

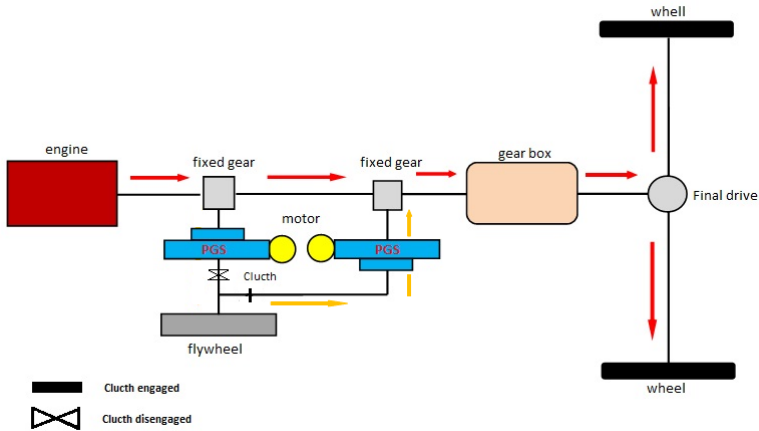
Pada mode ini dilakukan jika *flywheel* sudah *charge maximum* atau sudah mencapai energi maksimum yang telah dirancang. $P_e > P_d$ & *Flywheel full charge*, Pada kondisi ini kebutuhan daya untuk mendorong kendaraan masih terpenuhi oleh daya dari *engine*. Ketika *flywheel* sudah dalam kondisi *full Charge*, maka daya *engine* hanya digunakan untuk memenuhi daya untuk mendorong kendaraan saja. Aliran daya digambarkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Aliran Daya pada Mode *Direct Engine*

2.2.1.1.3 Discharge

Pada mode ini dilakukan jika $P_e < P_d$, Pada kondisi ini daya *engine* digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya untuk mendorong kendaraan, karena kebutuhan untuk mendorong kendaraan lebih besar dari *engine*, maka sebagian daya diambil dari *flywheel*. Hal ini menyebabkan *flywheel* mengalami *Discharge*. Aliran daya digambarkan pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Aliran Daya pada Mode *Discharge*

2.2.2 Flywheel.

Penyimpanan *energy flywheel* dituliskan dalam persamaan (2.1), dimana E adalah energy kinetic yang tersimpan dalam *flywheel*, I adalah momen inersia *flywheel* dan ω adalah kecepatan *angular* dari *flywheel*.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.1)$$

Momen inersia merupakan fungsi dari bentuk dan massa, seperti pada persamaan (2.2)

$$dI = mr^2 \quad (2.2)$$

Untuk sebuah silinder pejal, persamaan inersia ditulis pada persamaan (2.3). Dimana h adalah panjang silinder, r adalah jari-jari dari silinder dan ρ massa jenis dari material silinder.

$$I = \frac{1}{2} r^2 h \rho \pi \quad (2.3)$$

Jika silinder berlubang maka dapat ditulis dengan persamaan (2.4)

$$I = \frac{1}{2} \rho \pi h (r_o^4 - r_i^4) \quad (2.4)$$

Dimana r_o adalah diameter luar silinder dan r_i adalah diameter dalam silinder. dengan persamaan (2.5) maka dapat dituliskan persamaan Energi yang dapat dituliskan oleh *flywheel* berbentuk silinder berlubang.

$$E = \frac{1}{4} \pi h \rho (r_o^4 - r_i^4) \omega^2 \quad (2.5)$$

Dari persamaan (2.5) ini jumlah *energy* yang dapat disimpan dan dilepas oleh *flywheel* ini tergantung dari putaran *angular* dari *flywheel*. Namun pada saat pengoperasian *flywheel* ini *flywheel* akan berputar dari putaran awal ω_1 ke putaran terakhir ω_2 . Maka dapat ditulis pada persamaan (2.6)

$$E = \frac{1}{4} \pi h \rho (r_o^4 - r_i^4) (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (2.6)$$

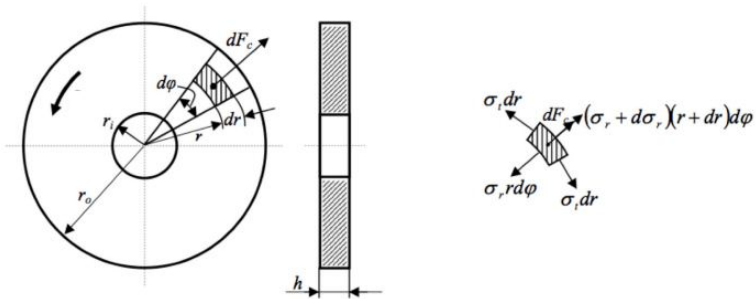
Koefisien fluktasi adalah variasi kecepatan yang diperlukan *flywheel* yang didefinisikan dengan persamaan (2.7)

$$\delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_{avg}} \quad (2.7)$$

Dimana δ adalah koefisien fluktuasi dan ω_{avg} adalah kecepatan sudut rata-rata *flywheel*. *Energy* yang dapat disimpan oleh *flywheel* ini tergantung pada kecepatan sudut *flywheel*. Namun ada batasan untuk seberapa cepat sebuah *flywheel* dapat berputar, ini tergantung pada *tensile strength* material. Pada sebuah silinder berlubang yang berputar akan menerima gaya radial dan gaya tangensial. Dengan asumsi bahwa *flywheel* memiliki tebal yang sama, maka nilai gaya sentrifugal dFc dapat dituliskan pada persamaan 2.8.

$$dF_c = dm r \omega^2 = \rho h d\varphi dr \omega^2 \quad (2.8)$$

Dimana dm adalah elemen kecil yang diberi gaya sentrifugal dan h adalah tebal *flywheel*.



Gambar 2.7 Gaya yang Bekerja pada Cylinder yang Berputar.

Pada gambar 2.7 terdapat elemen kecil yang bekerja pada cylinder saat berputar yang dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi - \sigma_r r d\varphi - 2 \sigma_t dr \sin \frac{d\varphi}{2} + \rho h r^2 d\varphi \omega^2 = 0 \quad (2.9)$$

Dari persamaan diatas dibagi dengan $r dr d\varphi$ dan eliminasi diffrensial orde tinggi didapat:

$$-\frac{\sigma_t - \sigma_r}{r} + \frac{d\sigma_r}{dr} + \rho h r \omega^2 = 0 \quad (2.10)$$

Dimana hubungan tegangan dan regangan dua dimensi sebagai berikut.

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_t + \nu\varepsilon_r) \quad \text{dan} \quad \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_r + \nu\varepsilon_t) \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \text{ dan } \varepsilon_t = \frac{u}{r} \quad (2.12)$$

Substitusi persamaan 2.11 ke persamaan 2.12, selanjutnya disubstitusikan ke persamaan 2.10

$$\sigma_t = \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{u}{r} + v \frac{du}{dr} \right) \text{ dan } \sigma_r = \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{du}{dr} + v \frac{u}{r} \right) \quad (2.13)$$

$$-\frac{E}{1-v^2} \left(\frac{u}{r^2} + \frac{v}{r} \frac{du}{dr} - \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{vu}{r^2} \right) + \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{du}{dr} - \frac{vu}{r^2} \right) - \rho h r \omega^2 = 0 \quad (2.14)$$

Persamaan 2.14 di integralkan pertama untuk mendapatkan.

$$\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} = \frac{1-v^2}{E} \frac{\rho \omega^2 r^2}{2} + c1 \quad (2.15)$$

Dikalikan dengan dengan r didapat.

$$r \frac{du}{dr} - u = \frac{1-v^2}{E} \frac{\rho \omega^2 r^3}{2} + c1 r \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 di integralkan pertama untuk mendapatkan.

$$u = \frac{1-v^2}{E} \frac{\rho \omega^2 r^3}{2} - \frac{c1 r}{2} - \frac{c2}{r} \quad (2.17)$$

Persamaan 2.17 merupakan persamaan perpindahan radial elemen-elemen dinding silinder fungsi posisi elemen tersebut. Substitusi persamaan 2.17 ke persamaan 2.11 untuk menghasilkan tegangan tangensial dan tegangan radial.

$$\sigma_t = \frac{Ec1}{2(1-v)} + \frac{Ec2}{1+v} \frac{1}{r^2} - \frac{(1+3v)\rho \omega^2}{8} r^2 \quad (2.18)$$

$$\sigma_r = \frac{Ec1}{2(1-v)} - \frac{Ec2}{1+v} \frac{1}{r^2} - \frac{(3+v)\rho \omega^2}{8} r^2 \quad (2.19)$$

Dengan *boundary condition* tidak ada tekanan dari dalam silinder dan tidak ada tekanan dari luar silinder. Maka $\sigma_r (r = r_i) = 0$ dan $\sigma_r (r = r_o) = 0$. Dapat dituliskan persamaan tegangan tangensial dan tegangan radial pada saat silinder berputar sebagai berikut.

Tegangan tangensial

$$\sigma_t = \frac{(3+v)\rho\omega^2}{8} \left[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - \frac{1+3v}{3+v} r^2 \right] \quad (2.20)$$

Tegangan radial

$$\sigma_r = \frac{(3+v)\rho\omega^2}{8} \left[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - r^2 \right] \quad (2.12)$$

Pada sebuah *flywheel* yang berputar tentunya ada gaya-gaya yang menghambat atau melawan. Gaya-gaya tersebut dapat dibagi 2 yaitu, gaya akibat *aerodynamic drag* sewaktu *flywheel* berputar dan gaya akibat gesekan antara komponen berputar. Gaya *aerodynamic drag* dapat dituliskan pada persamaan (2.22)

$$F_{plate} = 1/2 C_{Df} \rho AV^2 \quad (2.22)$$

Dimana F_{plate} adalah daya *aerodynamic drag* pada sebuah plat. Dengan mengasumsikan h adalah tebal dari *flywheel*, maka didapat nilai torsi aerodynamical *drag* pada persamaan (2.23)

$$T_d = \pi \rho C_{Df} \omega^2 \left(\frac{2}{5} r^5 + h r^4 \right) \quad (2.23)$$

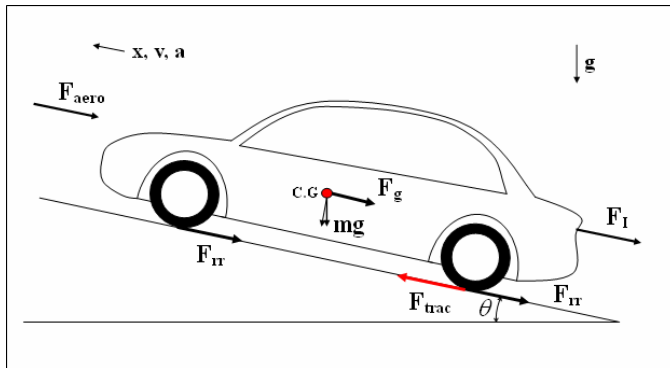
Untuk mendapatkan nilai koefisien *drag* geser dapat didekatkan dengan persamaan (2.24)

$$C_{Df} = \frac{0.455}{(\log(Re))^{2.58}} \quad (2.24)$$

2.2.3 Dinamika kendaraan

2.2.3.1 Traksi kendaraan

Sebuah kendaraan akan mengalami gaya-gaya yang bekerja pada sebuah kendaraan yang sejajar dengan arah akselerasi dapat dijabarkan dalam gambar berikut.



Gambar 2.8 Dinamika Kendaraan

F_{traksi} adalah gaya dorong kendaraan oleh mesin pada roda penggerak. Dalam tujuannya memenuhi *driving demand*, gaya ini dihambat oleh gaya hambat kendaraan. Gaya hambat pada kendaraan dapat dijabarkan dalam tiga macam gaya. Pertama adalah gaya hambat karena udara. Gaya ini disebut *drag force*. Besarnya gaya ini dipengaruhi oleh *massa jenis udara* (ρ), *luasannya frontal area* (A), *koefisien drag* (C), dan *kecepatan kendaraan* (V).

$$F_{\text{drag}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 \quad \dots(2.25)$$

Gaya yang kedua adalah *rolling resistant*. Yaitu gaya hambat karena gesekan ban dengan jalan. Besarnya gaya ini dipengaruhi oleh koefisien *rolling* (C_{rr}), *massa kendaraan* (m), *percepatan gravitasi* (g), dan *sudut tanjakan kendaraan* (θ).

$$F_{\text{rolling}} = C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad \dots(2.26)$$

Gaya yang ketiga adalah gaya hambat karena sudut kemiringan jalan. Besar gaya ini dipengaruhi oleh berat kendaraan dan sudut kemiringan jalan.

$$F_{grade} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad \dots(2.27)$$

2.2.3.2 Akselerasi kendaraan

Akselerasi memiliki pengaruh besar pada performa kendaraan. Untuk melakukan akselerasi, diperlukan gaya lebih karena harus melawan gaya inersia kendaraan. Gaya inersia karena akselerasi ini dipengaruhi oleh besar akselerasi (a) dan massa kendaraan.

$$F_{inertia} = m \cdot a \quad \dots(2.28)$$

Pada sebuah kendaraan yang dipacu dengan akselerasi tertentu, gaya traksi yang harus dicapai oleh mesin dapat dijabarkan sebagai penjumlahan dari gaya-gaya hambat dan inersia akibat percepatan. Dan daya traksi merupakan perkalian gaya dengan kecepatan.

$$F_{traksi} = F_{drag} + F_{rr} + F_{grade} + F_{inertia} \quad \dots(2.29)$$

$$P_{traksi} = (F_{drag} + F_{rr} + F_{grade} + F_{inertia})V \quad \dots(2.30)$$

V = kecepatan kendaraan

P_{traksi} digunakan sebagai referensi daya yang harus dihasilkan *engine* agar kendaraan mampu beregerak sesuai dengan *driving demand*. Daya *engine* yang dihasilkan harus sama dengan atau lebih besar dari daya traksi dibagi efisiensi transmisi.

$$P_{engine} \geq \frac{P_{traksi}}{Eff_{transmisi}} \quad \dots(2.31)$$

2.2.3.3 Kondisi kecepatan konstan

Pada kondisi kecepatan konstan, gaya inersia diabaikan karena percepatan bernilai nol.

$$P_{trac,wheel} = (F_{aero} + F_{grade} + F_{rr})V \quad \dots(2.32)$$

Kecepatan yang bernilai konstan digunakan sebagai acuan dalam menghitung performa *engine*.

2.2.3.4 Kondisi deselerasi

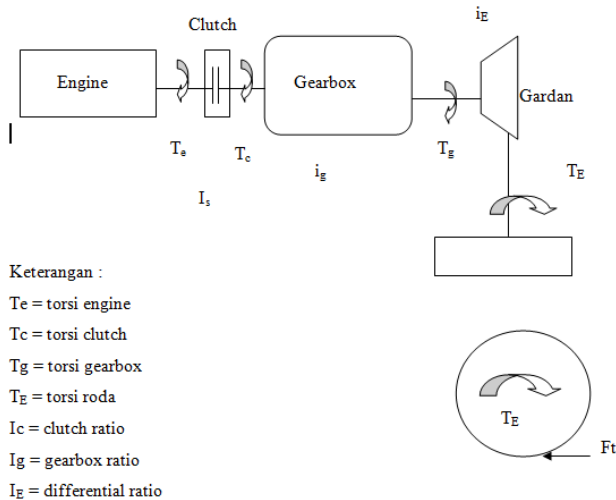
Kendaraan dapat berada dalam kondisi deselerasi baik saat mesin dimatikan maupun saat mesin hidup. Saat kondisi mesin mati, mesin tidak tersambung dengan roda penggerak sehingga tidak menimbulkan kerugian daya karena *engine break*. Untuk dapat terus bergerak dan melawan gaya hambat, kendaraan hanya digerakkan oleh inersia kendaraan itu sendiri. Nilai perlambatan dapat dihitung dengan perumusan.

$$m.a = F_{drag} + F_{rr} + F_{grade} - F_{trac} \quad \dots(2.33)$$

Percepatan selalu digunakan sebagai acuan awal dalam menghitung performa *engine*.

2.2.4 Sistem transmisi kendaraan

Semua kendaraan memerlukan sebuah *system* transmisi. *Drive train* sendiri adalah sebuah *system* yang menghubungkan *power train* atau sumber penggerak kepada roda kendaraan. *Drive train* ini sendiri memiliki fungsi untuk merubah torsi dan kecepatan putaran *engine* yang disesuaikan dengan fungsi dan kebutuhan kendaraan.



Gambar 2.9 Gambar *Drive Train* Kendaraan

Untuk mendapatkan nilai traksi kendaraan maka dapat digunakan persamaan.(2.34)

$$F_T = T_e \cdot (i_s \cdot i_g \cdot i_E \cdot i_{dynamic}) \quad (2.34)$$

Dengan mengasumsikan kendaraan tidak mengalami slip, maka dapat dituliskan kecepatan kendaraan dengan persamaan (2.35).

$$V = \frac{n_e R_{dyn}}{i_s i_g i_E} \frac{2\pi}{60} \quad (2.35)$$

Dengan n_e adalah putaran *engine* dalam rotasi per menit (RPM).

2.2.5 Trans Jakarta

Transjakarta atau umum disebut sebagai Busway adalah sebuah sistem transportasi Bus Rapid Transit (BRT) pertama di Asia Tenggara dan Selatan, yang beroperasi sejak tahun 2004 di

Jakarta, Indonesia. Trans Jakarta dirancang sebagai transportasi massal pendukung aktivitas ibukota yang sangat padat. Transjakarta merupakan sistem BRT dengan jalur lintasan terpanjang di dunia (208 km), serta memiliki 228 halte yang tersebar dalam 12 koridor (jalur), yang beroperasi dari 05.00 - 22.00 WIB. Jumlah rata-rata harian penggunaan Transjakarta diprediksikan sekitar 350.000 orang.



Gambar 2.10 Kendaraan Bus Trans Jakarta

Kendaraan Bus Trans Jakarta ini berjalan dengan kecepatan sesuai dengan *driving cycle* yang telah didesain oleh Trans Jakarta sendiri. Dari *driving cycle* ini akan menentukan kapan bus Trans Jakarta harus melakukan percepatan, kecepatan konstan dan perlambatan. Selain itu dari *driving cycle* Trans Jakarta ini juga akan menentukan berapa lama kendaraan akan berhenti di suatu halte. Berikut *driving cycle* Bus Trans Jakarta yang dibahas pada tugas akhir ini table 2.1

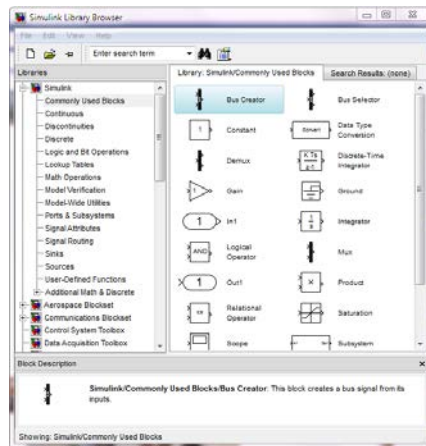
Tabel 2.1 Tabel Waktu Tempuh dan Kecepatan Perjalanan Halte Pulogaung – Halte Asmi

Lokasi	Waktu Travel (det)	Time (det)	Kecepatan (Km/jam)
		0	0
Pulogadung		300	0
	390.24	313.89	12
		680.98	12
		690.24	0
Halte RS ediros	Tundaan simpang	706.24	0
	52.82	720.13	28.68
		749.8	28.68
		759.06	0
Halte Gading		775.06	0
	57.54	788.95	31.25
		823.34	31.25
		832.6	0
Simpang K Gading	Tundaan simpang	848.6	0
	34.24	862.49	11.68
		873.58	11.68
		882.84	0
Halte pulomas		898.84	0
	90.2	911.84	41.66
		979.78	41.66
		989.04	0
Halte Asmi	Tundaan simpang	1005.04	0

2.2.6. SIMULINK MATLAB

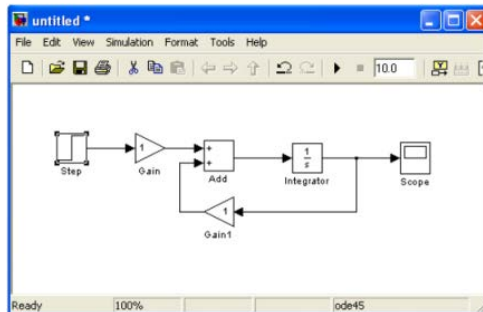
Simulink merupakan bagian tambahan dari *software* MATLAB (Mathworks Inc.). Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antar muka grafis (GUI). Simulink terdiri dari beberapa kumpulan toolbox yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier. Beberapa *library* yang sering digunakan dalam sistem kontrol antara lain *math*, *sinks*, dan *sources*.

Simulink pada matlab dibuka dengan *library browser*. *Library browser* digunakan untuk membuat model blok simulasi. Pada Simulink matlab antara lain berisi *Continuous Elements*, *Discontinuous Elements*, *Math Operations*, *Signal Routing*, *Sink Models*, dan *Signal Routing*.



Gambar 2.11 *Library Browser*

Membuat model pada simulink matlab dilakukan dengan cara membuat model baru pada *library browser*. Kemudian memasang blok-blok yang diinginkan dan menyambungkannya dengan konektor. Contoh sederhana dari blok diagram dapat dilihat sebagai berikut:



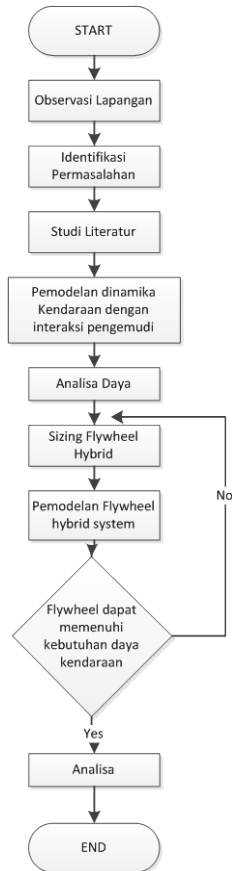
Gambar 2.12 Contoh Blok Simulink

Setelah membuat blok, langkah selanjutnya adalah dengan mengedit properties dari masing-masing blok. Setelah itu dilakukan *configuration parameters* untuk mengatur simulasi yang sesuai model. Langkah terakhir adalah dengan menjalankan simulasi sehingga akan didapatkan hasil yang di inginkan.

BAB III METODOLOGI

3.1 Metodologi Penelitian

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, disusunlah sejumlah tahapan yang merupakan langkah – langkah dalam mewujudkan tujuan. Tahapan tersebut dinyatakan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir secara Global

Metodologi dalam pelaksanaan tugas akhir ini secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1 dimulai dengan studi literatur mengenai *hybrid flywheel*. selanjutnya mengidentifikasi permasalahan pada mekanisme kemudian membuat pemodelan kendaraan Bus INKA Trans Jakarta. Setelah selesai membuat pemodelan, penulis mensimulasikan pemodelan tersebut dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK untuk mendapatkan Kebutuhan Daya setiap saat untuk menggerakkan kendaraan setiap saat dengan *driving cycle* yang sudah ditentukan Trans Jakarta. Selanjutnya memasukan pemodelan *hybrid Flywheel system* pada kendaraan dan mensimulasikan untuk mendapatkan energy yang disimpan dan dilepas *Flywheel*.

3.2 Observasi Lapangan

Obsersasi lapangan ini dilakukan dengan mengobservasi kendaraan Bus Trans Jakarta. Pada tahap ini mengumpulkan data dari kendaraan Trans Jakarta dan pada saat pengoperasian sewaktu berjalan dan berhenti untuk mengangkut dan menurunkan penumpang pada halte-halte yang dilewati. Pengoperasian Transjakarta untk mencapai halte-halte dalam waktu yang telah ditentukan akan membentuk sebuah *driving cycle* Trans Jakarta.

3.2.1 Data ATC Bus Trans Jakarta

m_f	: 27900 Kg	massa kendaraan penuh
m_k	: 5200 Kg	massa kendaraan kosong
A	: 8.65 m ²	Luas frontal kendaraan
Cd	: 0.8 -	Koefisien drag Kendaraan
ρ	: 1.2 kg/m ³	Massa jenis udara
r_{dyn}	: 0.478 m	radius dinamik kendaraan

3.2.2 Data transmisi ATC Bus Trans Jakarta

Is : 2.16

ratio moving off element kendaraan

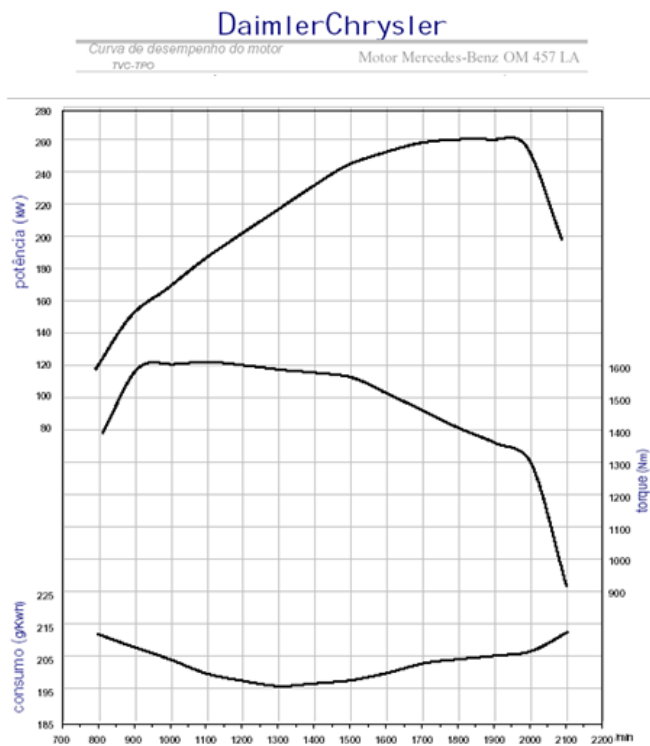
Ig : [3.43 2.01 1.42 1.00 0.83]

ratio gearbox kendaraan

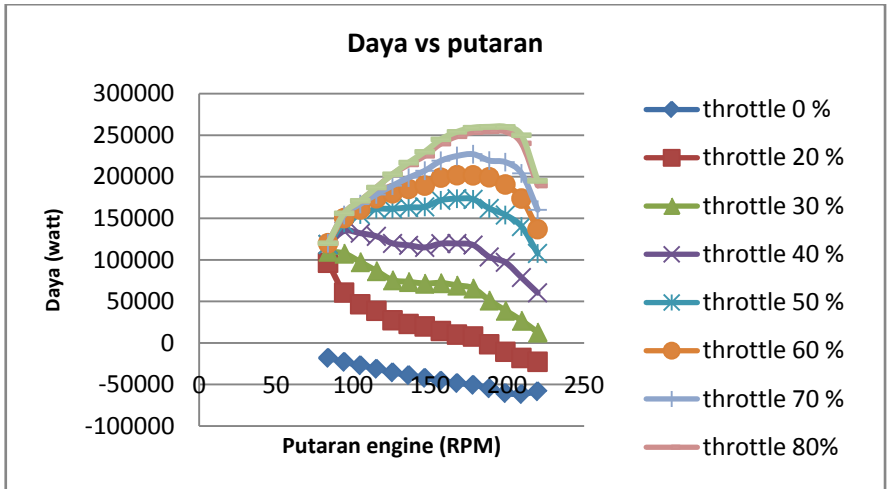
IE : 5

ratio final gear kendaraan

3.2.3 Data engine ATC Bus Trans Jakarta



Gambar 3.2 Data Engine pada ATC Bus Trans Jakarta



Gambar 3.3 Grafik Torsi vs Putaran dengan Variasi Buka-an Throttle

3.3 Identifikasi Masalah

Pada tahap observasi lapangan ini kendaraan Trans Jakarta ini bergerak dengan *dirving cycle* yang telah ditentukan untuk mencapai halte-halte yang dilewati Bus Trans Jakarta. Dari *driving cycle* dapat dilihat bahwa kendaraan Bus Trans Jakarta ini akan berhenti di setiap halte yang dilewatinya. Karena kendaraan berhenti dan berjalan kembali, maka kendaraan banyak melakukan percepatan dan perlambatan. Karena Bus Trans Jakarta ini adalah kendaraan angkut massal yang memiliki massa yang cukup besar, maka diperlukan daya yang besar agar kendaraan dapat berjalan. Perlu diketahui berapa daya kebutuhan dari Bus Trans Jakarta dan perlu diketahui apakah Bus Trans Jakarta dapat memenuhi kebutuhan daya dorong kendaraan dengan *engine* yang sudah ada. Dengan mengetahui kebutuhan daya kendaraan dan daya *engine* perlu diketahui apakah kinerja *flywheel hybrid* pada saat *charging* dan *discharging* pada *flywheel hybrid* sistem.

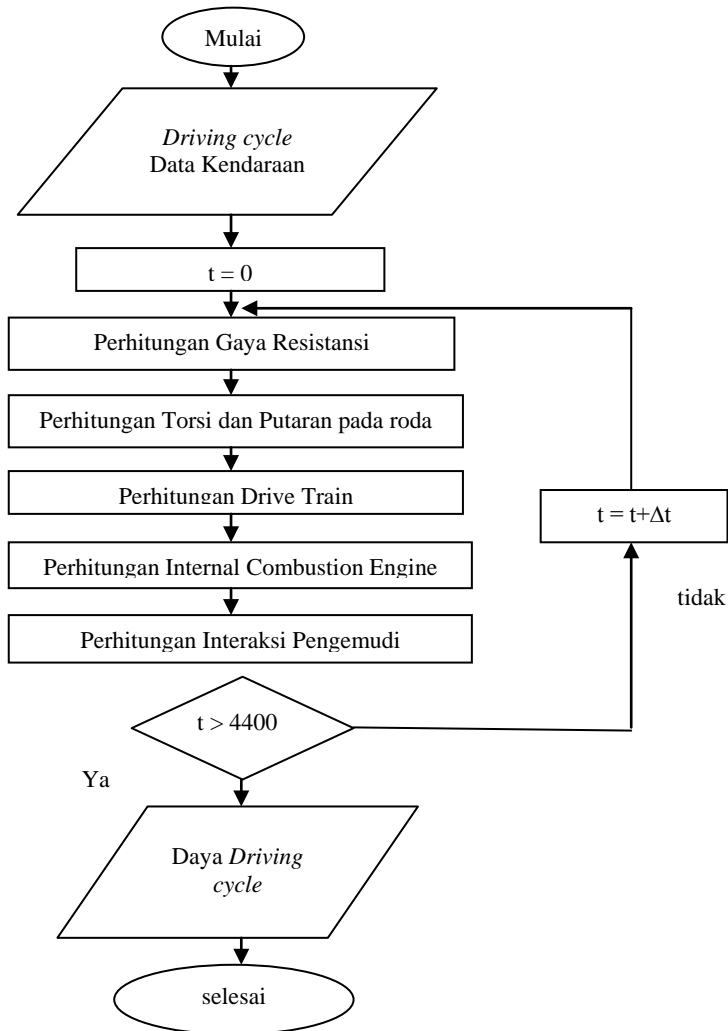
3.4 Studi Literatur

Sebuah penelitian yang dilakukan oleh B. H Wang pada tahun 2008 melakukan penelitian dengan mensimulasikan kendaraan umum Bus yang ada di Cina dengan pemodelan. Dari hasil pemodelan ini didapatkan konsumsi bahan bakar kendaraan dan torsi untuk menggerakkan kendaraan sesuai dengan *driving cycle* yang telah ditentukan.

Dari penelitian D. Cross membahas sebuah kendaraan *hybrid* dengan penyimpanan energinya disimpan pada *flywheel*. Pada penelitian ini juga dibahas bahwa *Flywheel* memiliki power density yang sangat besar, power density yang besar ini adalah keunggulan *Flywheel* dari energy storage *system* yang lain yang memiliki energy density yang besar namun memiliki power density yang kecil. Power density yang besar ini sangat cocok untuk sebuah *system* yang memerlukan daya yang besar untuk waktu yang singkat.

3.5 Pemodelan Bus Trans Jakarta dengan Interaksi Pengemudi.

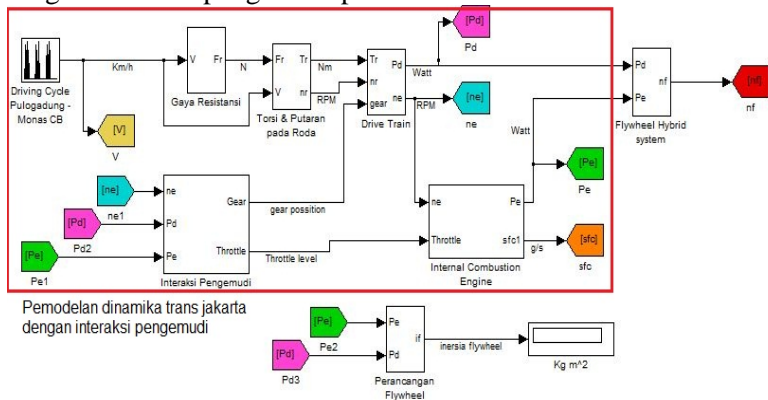
Pemodelan Bus Trans Jakarta ini dibuat dengan langkah-langkah seperti pada flowchart dibawah agar mendapatkan hasil yang diinginkan yaitu peta kebutuhan daya dorong kendaraan pada saat berjalan dengan *driving cycle* yang telah ditentukan dan daya yang dihasilkan oleh *engine*. Selain itu pada pemodelan dinamika bus trans Jakarta diharapkan mendapatkan nilai konsumsi bahan bakar sebagai pembandingan dengan pemodelan dengan throttle level yang lain.



Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Dinamika Bus Trans Jakarta dengan Interaksi Pengemudi

Pada gambar 3.4 adalah diagram alir pemodelan dinamika bus trans Jakarta dengan interaksi pengemudi. Pada pemodelan ini digunakan *driving cycle* pulogadung – monas yang memiliki waktu operasi selama 4400 detik, maka setelah 4400 detik simulasi akan berhenti. Pada pemodelan dinamika bus trans Jakarta dengan interaksi pengemudi ini seluruh data bus, konstanta, dan *driving cycle* akan dimasukkan pada m-file pada matlab yang berjudul transJKT.m. semua m-file yang digunakan pada pemodelan dinamika Bus Trans Jakarta ada pada lampiran.

Pemodelan dinamika bus trans Jakarta dengan interaksi pengemudi ini akan dibuat pada matlab simulink. Pada matlab simulink ini akan dibuat 5 buah subsystem yang membagi pemodelan sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.4. berikut pemodelan dinamika bus trans Jakarta dengan interaksi pengemudi pada matlab simulink.



Gambar 3.5 Model Dinamika Bus Trans Jakarta dengan Interaksi Pengemudi pada Matlab Simulink.

3.5.1 Pemodelan gaya resistansi

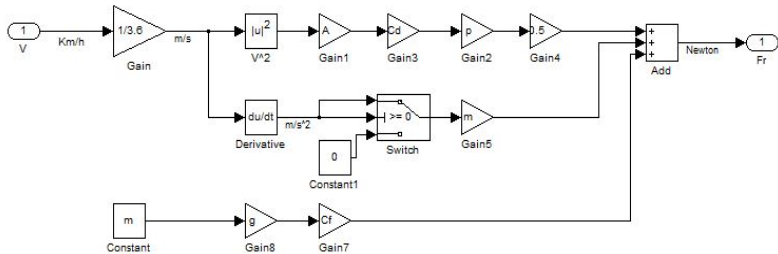
Langkah pertama untuk membuat pemodelan dinamika Bus Trans Jakarta dengan interaksi pengemudi adalah membuat model gaya resistansi. Gaya resistansi atau gaya

traksi yang terjadi pada kendaraan dapat dituliskan pada persamaan 2.29.

$$F_{traksi} = F_{drag} + F_{rr} + F_{grade} + F_{inertia} \quad (2.29)$$

$$F_{resistansi} = \frac{1}{2} \rho C_d A V(t)^2 + mg \sin \theta + mg C_f \cos \theta + m a(t) \quad (3.1)$$

Pada pemodelan ini jalan dianggap lurus dan tidak ada gradient tanjakan, maka nilai dari F_{grade} sama dengan nol. Pada persamaan diatas nilai dari F_{drag} dan $F_{inertia}$ ini merupakan fungsi dari kecepatan kendaraan, maka nilai dari F_{drag} dan $F_{inertia}$ akan berubah berdasarkan nilai dari *driving cycle*. Pada nilai $F_{inertia}$ ini besar nilai percepatan kendaraan adalah turunan pertama dari *driving cycle*. Berikut model Gaya resistansi pada matlab simulink.



Gambar 3.6 Model Gaya Resistansi pada Matlab Simulink

Dari model gaya resistansi diatas dapat dilihat persamaan untuk mencari nilai F_{rr} , F_{drag} dan $F_{inertia}$. Pada persamaan $F_{inertia}$ nilai dari percepatan kendaraan diberi sebuah switch yang berfungsi untuk menghilangkan nilai perlambatan pada kendaraan. Perlambatan pada kendaraan akan menyebabkan nilai dari $F_{inertia}$ lebih kecil dari nol yang artinya kendaraan memberikan gaya pada kendaraan, karena pada pemodelan ini tidak memasukkan regenerative braking maka nilai dari perlambatan kendaraan dianggap nol.

3.5.2 Pemodelan torsi dan putaran pada roda.

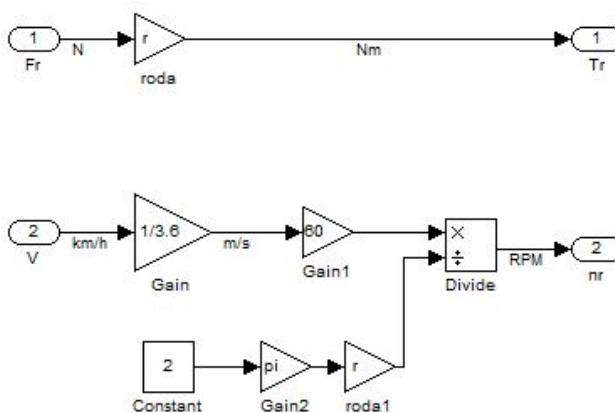
Pemodelan torsi dan putaran pada roda dilakukan untuk mencari nilai torsi dan putaran sudut kendaraan pada bagian roda. Pada pemodelan ini yang menjadi input adalah gaya resistansi dan kecepatan kendaraan. Untuk mendapatkan nilai torsi pada ban digunakan persamaan 3.2

$$T_{roda} = F_{resistansi} * r_{dynamic} \quad (3.2)$$

untuk mencari putaran sudut digunakan persamaan 3.3, yang dikonversikan menjadi rotation per menit.

$$\omega_{roda} = \frac{V(t)}{r_{dynamic}} \frac{60}{2\pi} \quad (3.3)$$

Pada pemodelan ini nilai radius dynamic roda dianggap konstan, walaupun kecepatan kendaraan berubah-ubah. Berikut pemodelan torsi dan putaran pada roda yang dibuat pada matlab simulink.



Gamabr 3.7 Model Torsi dan Putaran Roda pada Matlab Simulink.

3.5.3 Pemodelan drive train

Pada pemodelan drive train ini digunakan untuk mencari torsi dan putaran sudut pada semua komponen drive train kendaraan dan *engine*. Pada pemodelan ini yang menjadi input adalah torsi pada roda dan putaran sudut pada roda dan yang menjadi output adalah daya yang harus disediakan oleh *engine* atau daya *driving cycle* dan putaran pada *engine*. Sebelumnya perlu didapatkan nilai torsi pada *engine* yang dapat dituliskan pada persamaan 3.4

$$T_e = \frac{T_r}{[i_E i_g i_s]} \quad (3.4)$$

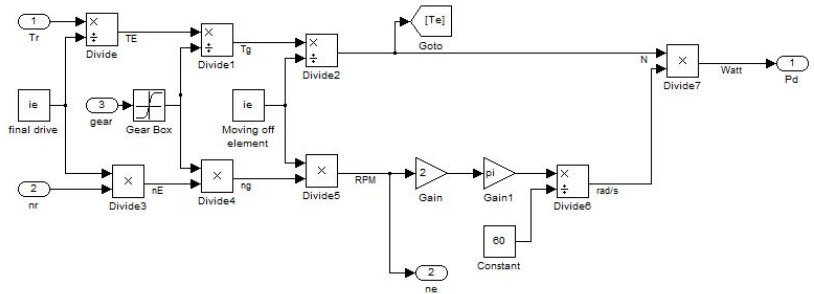
Untuk mendapatkan nilai putaran sudut pada *engine* digunakan persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$n_e = n_r [i_E i_g i_s] \quad (3.5)$$

Pada pemodelan drive train ini nilai dari i_g atau ratio pada gear box akan berubah-ubah tergantung gear shift logic. Setelah mendapatkan nilai torsi pada *engine* dan putaran pada *engine*, dapat dicari daya yang harus disediakan oleh *engine* atau daya *driving cycle* dengan persamaan 3.6

$$P_d = T_e n_e \quad (3.6)$$

Pada pemodelan ini seluruh komponen drive train akan mentransferkan daya tanpa adanya losses. Berikut pemodelan drive train pada matlab simulink.



Gambar 3.8 Model Drive Train pada Matlab Simulink.

3.5.4 Pemodelan *internal combustion engine*

Pada pemodelan *internal combustion engine* ini digunakan untuk mencari nilai daya yang dihasilkan oleh *engine* dan nilai konsumsi bahan bakar kendaraan. Pada pemodelan ini yang menjadi input adalah throttle level dan putaran *engine*. Torsi yang dihasilkan oleh *engine* merupakan fungsi yang dari throttle level dan putaran *engine* yang dapat dituliskan pada persamaan.

$$T_{Engine} = f [\textit{Throttle level} (t), \textit{Putaran engine} (t)] \quad (3.7)$$

Dengan mengetahui nilai throttle level dan nilai putaran *engine* dapat diketahui torsi *engine* dari gambar 3.3 atau dapat dilihat pada lampiran torsi *engine*. Untuk mencari nilai daya yang dihasilkan oleh *engine* digunakan persamaan 3.6.

$$P_{engine} = T_{engine} * n_{engine}$$

Pada *throttle level* ini akan berubah-ubah tergantung dengan *throttle level logic*. Untuk mencari nilai konsumsi bahan bakar, perlu diketahui nilai spesifik *fuel consumption* (sfc) kendaraan dalam satuan g/kWh. Nilai sfc ini

merupakan fungsi dari daya yang dihasilkan oleh *engine* dan putaran *engine* yang dapat dilihat pada lampiran, pada *sfc* kendaraan. Persamaan 3.8 dapat dituliskan.

$$sfc = f [P_{engine}(t), \text{Putaran } engine(t)] \quad (3.8)$$

. Setelah mendapatkan nilai *sfc* kendaraan perlu dicari nilai absolute fuel consumption kendaraan atau b_e . dalam satuan g/s Nilai b_e didapatkan dari perkalian antara *sfc* dan daya yang dihasilkan oleh *engine* yang dapat dituliskan pada persamaan 3.9.

$$b_e = \frac{sfc * P_{engine}}{3600} \quad (3.9)$$

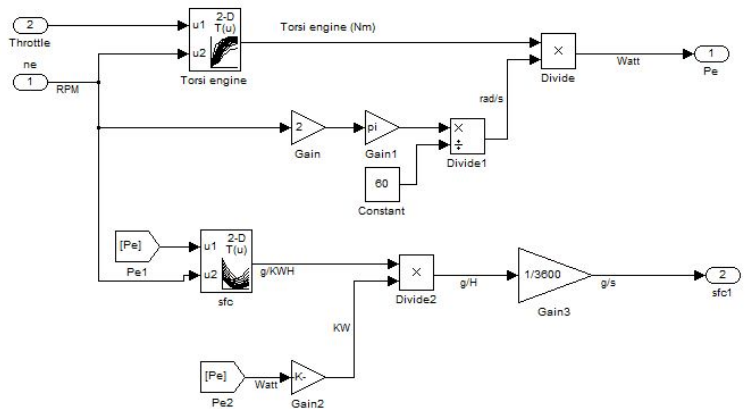
Setelah mendapatkan nilai b_e perlu dicari nilai konsumsi bahan bakar total saat simulasi atau m dalam satuan gram. Nilai konsumsi bahan bakar total didapatkan dari mengintegalkan sekali nilai absolute fuel consumption yang dapat dituliskan pada persamaan 3.10.

$$m = \int b_e dt \quad (3.10)$$

Setelah mendapatkan nilai konsumsi bahan bakar total akan dikonversikan dalam satuan Km/Liter, ini dapat dilakukan dengan cara membagi jarak tempuh pada simulasi dengan total konsumsi bahan bakar yang telah diubah menjadi volume dalam satuan liter.

$$\text{Konsumsi bahan bakar} = \frac{S}{m/\rho} \quad (3.11)$$

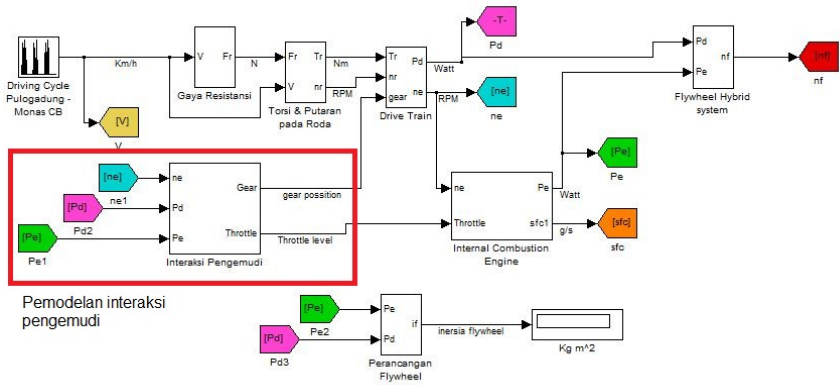
Dimana S adalah jarak total tempuh kendaraan dan ρ adalah massa jenis bahan bakar. Berikut pemodelan *internal combustion engine* pada matlab simulink.



Gambar 3.9 Model Internal Combustion Engine pada Matlab Simulink.

3.5.5 Pemodelan interaksi pengemudi

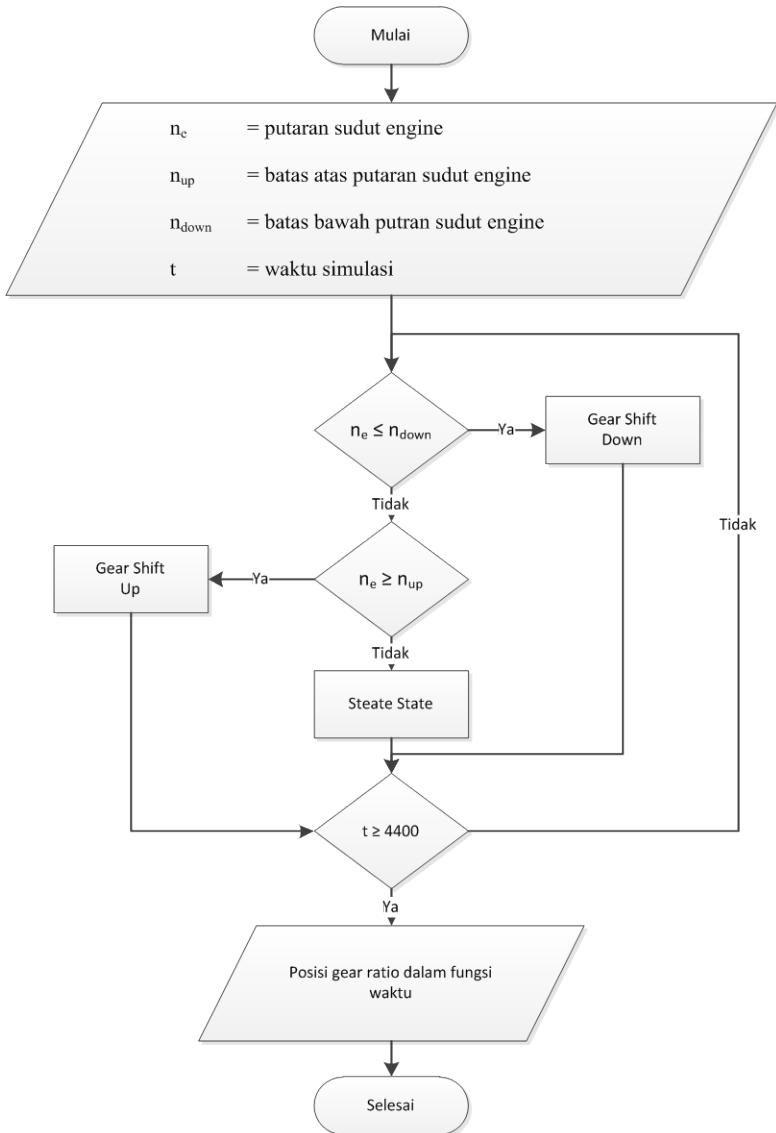
Pada pemodelan interaksi pengemudi ini akan digunakan sebagai pengganti pengemudi bus trans Jakarta pada saat berjalan dengan *driving cycle* pulogadung monas CB. Dalam pemodelan ini akan dibagi menjadi 2 model yaitu pemodelan gear shift logic dan pemodelan *throttle level logic*. Berikut pemodelan interaksi pengemudi pada matlab simulink.



Gambar 3.10 Model Interaksi Pengemudi pada Matlab Simulink.

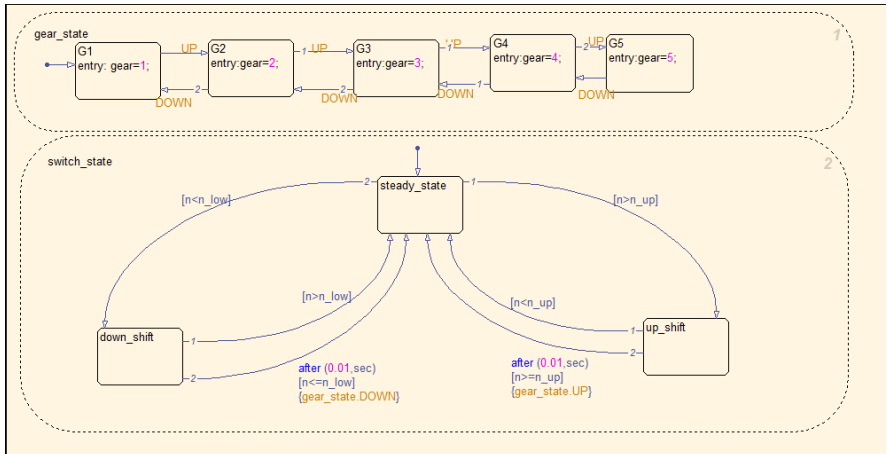
3.5.5.1 Pemodelan gear shift logic

Gear shift logic digunakan sebagai pengganti pengemudi pada saat mengganti *gear ratio* pada simulasi Pemodelan dinamika Bus Trans Jakarta dengan interaksi pengemudi. Dalam pembuatan model ini dibuat *flowchart gear shift logic* sebagai berikut.



Gambar 3.11 Diagram Alir *Gear Shift Logic*

Dalam *gear shift logic* ini yang menjadi parameter kapan waktu untuk mengganti *gear ratio* pada *gearbox* adalah putaran *engine*. Dari hasil dynotest *engine* kendaraan dapat diketahui spesifik *fuel consumption* (sfc) kendaraan dalam fungsi putaran *engine*, dari data ini dapat diketahui bahwa kendaraan sfc paling kecil pada putaran 1300 RPM. Tapi untuk menjaga *engine* agar tetap bekerja pada satu titik akan sangat sulit, oleh karena itu dibuat rentang putran *engine* beroperasi. Rentang bawah atau n_{down} adalah 1100 RPM dan untuk rentang atas atau n_{up} adalah 1500 RPM. Jika putaran *engine* kendaraan lebih kecil dari pada n_{down} maka akan mengeluarkan perintah *Gear shift down* atau menurunkan satu posisi *gear ratio* pada *gearbox*. Namun jika putran *engine* lebih besar daripada n_{up} maka akan mengeluarkan perintah *Gear shift up* atau menaikkan satu posisi *gear ratio* pada *gearbox*. Terakhir jika putaran *engine* berada diantara n_{down} dan n_{up} maka akan mengeluarkan perintah *Steady state* atau tidak usah merubah posisi *gear ratio* pada *gearbox*. Dari *gear shift logic* ini hasil terakhir yang didapatkan adalah peta posisi *gear ratio gearbox* setiap saat. Di dalam pemodelan dinamika kendaraan digunakan Matlab stateflow untuk membuat *Gear shift logic*. Diagram stateflow pada matlab dibuat seperti pada gambar dibawah.

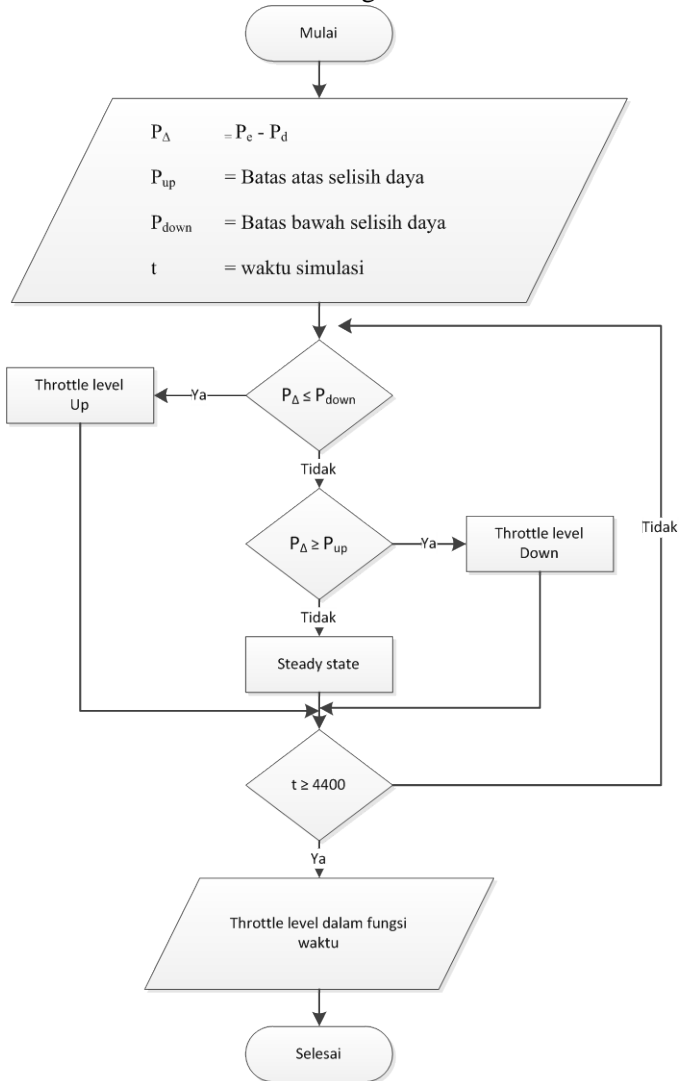


Gambar 3.12 Diagram Gear shift logic dalam Matlab Stateflow.

3.5.5.2 Pemodelan *throttle level logic*

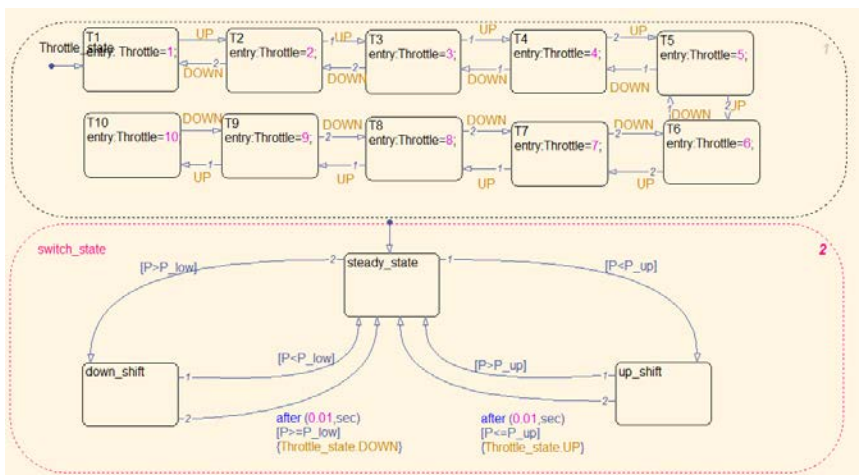
Agar Bus Trans Jakarta dapat berjalan dengan *driving cycle* yang telah ditentukan maka *engine* harus menghasilkan daya yang sama atau lebih besar daripada daya *driving cycle*, namun tidak terlalu besar daripada daya *driving cycle* karena jika bukaan *throttle* tetap di 100 % maka ini tidak akan mempresentasikan pengemudi yang biasa berkendara. Daya yang dihasilkan oleh *engine* akan dipengaruhi oleh 2 hal yaitu putaran *engine* dan *throttle level* seperti pada gambar 3.3. Untuk putaran *engine*, karena kendaraan bergerak dengan *driving cycle* maka putaran *engine* sudah ditentukan oleh *driving cycle* namun tetap akan berubah dengan perubahan gear ratio yang dipengaruhi oleh gear shift logic. Untuk level *throttle* akan ditentukan oleh *throttle level logic*. *Throttle level logic* yang digunakan sebagai pengganti pengemudi pada saat membuka level *throttle* agar kendaraan dapat berjalan sesuai dengan *driving*

cycle yang telah ditentukan. Dalam *throttle level logic* ini dibuat sebuah flowchart sebagai berikut.



Gambar 3.13 Diagram Alir *Throttle Level Logic*.

Karena tujuan dari *throttle level logic* ini adalah untuk menentukan posisi *level throttle* agar *engine* menghasilkan daya yang sama atau lebih besar dari pada daya *driving cycle* tapi tidak terlalu besar, maka yang menjadi parameter dari *throttle level logic* ini adalah selisih antara daya *engine* dan daya *driving cycle* dan batas bawah daya atau P_{down} dan batas atas daya atau P_{up} . Jika selisih daya lebih kecil dari pada P_{down} maka akan mengeluarkan perintah untuk *throttle level up* atau menaikkan posisi *throttle*. Namun jika selisih daya lebih besar dari pada P_{up} maka akan mengeluarkan perintah *throttle level down* maka akan mengeluarkan perintah untuk menurunkan posisi *throttle*. Dan jika selisih daya berada diantara P_{down} dan P_{up} maka akan mengeluarkan perintah *steady state* atau posisi *throttle* tetap. Hasil akhir dari *throttle level logic* ini adalah posisi *throttle* setiap saat. Didalam pemodelan dinamika kendaraan digunakan Matlab stateflow untuk membuat *Throttle level logic*. Diagram stateflow pada matlab dibuat seperti pada gambar dibawah.



Gambar 3.14 Diagram *Throttle level logic* pada Matlab Stateflow.

3.6 Analisa Daya

Dari hasil pemodelan dinamika kendaraan Bus Trans Jakarta dengan interaksi pengemudi ini akan mendapat nilai kebutuhan daya dorong kendaraan saat digerakan pada *driving cycle* Trans Jakarta dan daya yang dihasilkan oleh *engine*. Berikut hasil simulasi dinamika bus trans Jakarta pada saat berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB dengan massa penuh dan throttle 0-100 persen.



Gambar 3.15 Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine*.

Pada gambar 3.15 bagian atas merupakan grafik daya *driving cycle* setiap saat dalam satuan watt. Sumbu vertical menunjukkan daya dalam satuan watt dan sumbu horizontal menunjukkan waktu dalam satuan detik. Pada gambar 3.14 bagian bawah merupakan daya yang dihasilkan oleh *engine* setiap saat dalam satuan watt.

3.7 Perancangan Flywheel Hybrid

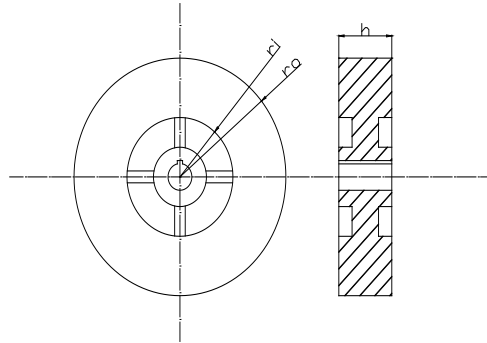
Dengan data peta kebutuhan daya kendaraan Bus Trans Jakarta pada saat berjalan dengan *driving cycle* Trans Jakarta dan peta daya yang dihasilkan oleh *engine* ini maka akan dirancang sebuah *flywheel* yang dapat membantu kinerja *engine* dan memenuhi kebutuhan daya kendaraan. Untuk mengetahui berapa energi yang perlu disimpan oleh *flywheel*, dapat dihitung dengan mengintegrasikan sekali daya terhadap waktu seperti pada persamaan 3.12.

$$E = \int P(t) dt \quad (3.12)$$

Daya yang digunakan adalah selisih antara daya *driving cycle* dan daya pada saat daya *driving cycle* lebih besar daripada daya *engine*.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P_{Driving\ Cycle}(t) - P_{Engine}(t) dt \quad (3.13)$$

Dimana t_1 adalah waktu pada saat daya *driving cycle* dan daya *engine* bertemu yang pertama dan t_2 adalah waktu pada saat daya *driving cycle* dan daya *engine* bertemu yang kedua. Dari kebutuhan energi ini maksimum dapat ditentukan berapa putaran operasi dari *flywheel* dengan mempertimbangkan nilai koefisien fluktuasi *flywheel*. Setelah itu maka perlu ditentukan Inersia *flywheel* dengan pertama menentukan jenis material yang digunakan dan dimensi *flywheel*. *Flywheel hybrid* yang digunakan pada *Flywheel hybrid system* pada Bus trans jakarta menggunakan *flywheel* dengan dimensi sebagai berikut.



Gambar 3.16 Dimensi Rancangan *Flywheel* Hybrid

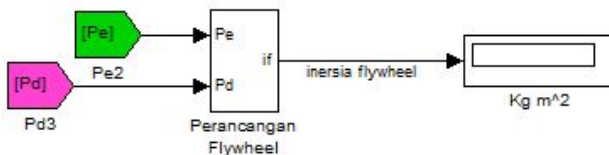
Dimana:

r_i = radius dalam *flywheel* (m)

r_o = radius luar *flywheel* (m)

h = panjang *flywheel* (m)

pada pemodelan perancangan *flywheel hybrid* digunakan matlab simulink. Yang menjadi input pada pemodelan ini adalah daya *driving cycle* dan daya *engine* pada saat kebutuhan daya maksimal dan putaran operasi *flywheel*. Dari hasil pemodelan akan didapatkan nilai inersia berputar *flywheel*. Berikut pemodelan perancangan *flywheel* pada matlab simulink.



Gambar 3.17 Model Perancangan *Flywheel* pada Matlab Simulink.

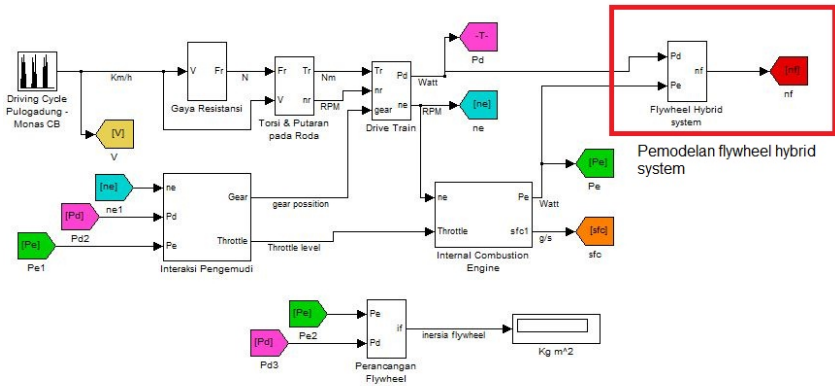
3.8 Pemodelan Flywheel Hybrid Sistem pada Bus Trans Jakarta

Setelah mendapatkan dimensi, jenis material dan kecepatan sudut untuk pengoprasian *flywheel* maka perlu dilakukan pemodelan *system flywheel hybrid* Bus Transjakarta untuk mengetahui apakah *Flywheel* yang telah di *design* dapat memenuhi daya kebutuhan daya dorong kendaraan untuk membantu kinerja *engine*. Pemodelan *Flywheel hybrid system* pada Bus Trans Jakarta ini pada intinya menentukan waktu *engine* dan *flywheel* saling berinteraksi atau kapan terjadi transfer energi diantara *engine* dan *flywheel*. Putus nyambung energi antara *engine* dan *flywheel* ini digunakan sebuah *moving off element* atau *Clutch*. Mode-mode pada *flywheel* dapat ditulis sebagai berikut.

Tabel 3.1 Tabel Mode pada *Flywheel hybrid System* pada Bus Trans Jakarta

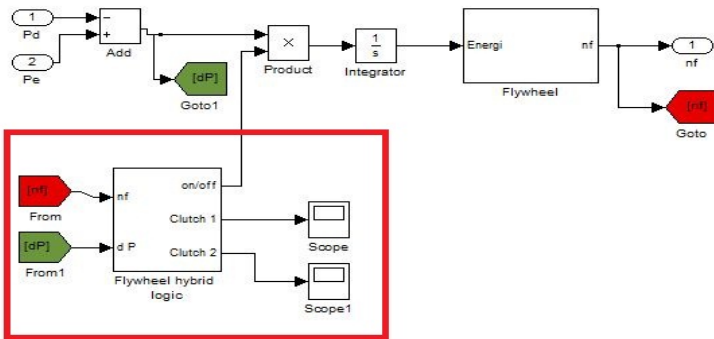
<i>ENGINE</i>	<i>FLYWHEEL</i>	<i>CLUTCH 1</i>	<i>CLUTCH 2</i>	<i>MODE</i>
$P_e > P_d$	$n_f < 12000$ RPM	on	off	<i>Charging</i>
$P_e > P_d$	$n_f \geq 16000$ RPM	off	off	<i>Direct engine</i>
$P_e < P_d$	$n_f > 0$ RPM	off	on	<i>Discharge</i>

Dari table 3.1 dapat dilihat bahwa ada 3 mode beroperasi yang digunakan pada *Flywheel hybrid system* Bus Trans Jakarta. 3 mode itu diantaranya *Charging*, *direct engine* dan *Discharge*. Dari tiga mode ini yang menjadi parameternya adalah ketersediaan daya yang dihasilkan oleh *engine* dalam Watt dan putaran sudut *flywheel* dalam satuan RPM. Berikut pemodelan *flywheel hybrid system*.



Gambar 3.18 Model *Flywheel Hybrid System* pada Matlab Simulink.

Pada pemodelan *flywheel hybrid system* merupakan sebuah subsystem yang memiliki model untuk mode operasi pada *flywheel hybrid system* seperti pada table 3.1. berikut model mode operasi pada matlab simulink.



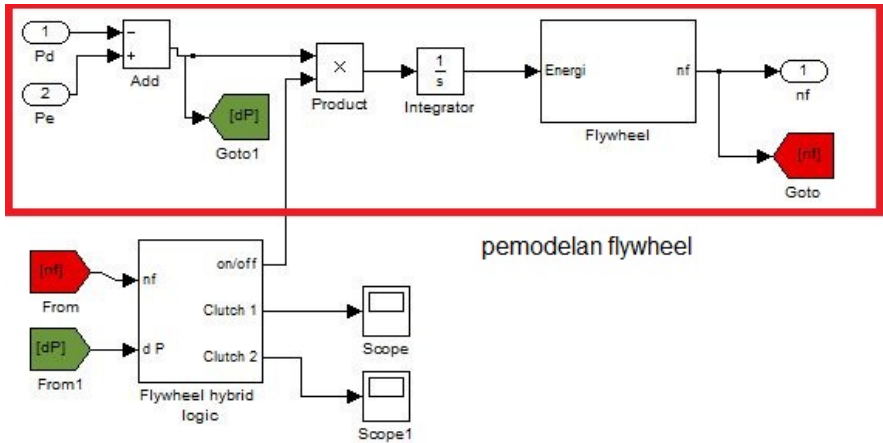
pemodelan mode operasi pada flywheel hybrid system

Gambar 3.19 Model Mode Operasi *Flywheel Hybrid System* pada Matlab Simulink.

Dapat dilihat dari model diatas yang menjadi input pada model adalah putaran *flywheel* dan selisih daya antara daya *driving cycle* dan daya *engine*. Pada pemodelan ini akan dihasilkan *output* berupa waktu pengoprasian *clutch* 1 dan *clutch* 2.

3.9 *Flywheel* Dapat Memenuhi Kebutuhan Daya Kendaraan.

Dalam tahap ini akan melihat hasil pemodelan *flywheel hybrid system* pada bus Trans Jakarta dengan menggunakan *Flywheel* yang sudah dirancang sebelumnya, yang dilihat adalah daya yang dihasilkan *flywheel* saat kendaraan membutuhkan daya, perlu dilihat apakah daya yang dihasilkan oleh *flywheel* memenuhi kebutuhan kendaraan. Jika daya yang dihasilkan oleh *flywheel* belum memenuhi maka perlu dilakukan ulang *Sizing flywheel* dan jika *flywheel* sudah memenuhi kebutuhan daya kendaraan maka dilakukan analisa sistem. Pada pemodelan yang menjadi *input* pada sistem adalah selisih energi antara daya *driving cycle* dan daya *engine*. Untuk melihat apakah *flywheel* dapat memenuhi selisih daya antara daya *driving cycle* dan daya *engine* dilihat putaran *flywheel*, apakah putaran *flywheel* setelah discharge lebih kecil dari pada nol. Jika putaran setelah discharge lebih besar dari pada nol maka *flywheel* dapat memenuhi selisih kebutuhan daya. Berikut pemodelan *flywheel* pada matlab simulink.



Gambar 3.20 Model *Flywheel* pada Matlab Simulink.

3.10 Analisa

Dari hasil pemodelan *flywheel hybrid system* Bus Transjakarta ini akan didapatkan waktu untuk penyerapan *energy Flywheel* dari *engine* dan pelepasan *energy flywheel* pada saat membantu kinerja *engine* untuk memenuhi kebutuhan daya dorong kendaraan.

3.11 Kesimpulan

Tahap akhir dari tugas akhir ini adalah penarikan kesimpulan berdasarkan analisa pada jumlah kebutuhan daya dorong kendaraan setiap saat, hasil sizing *flywheel hybrid* dan Sistem *Flywheel hybrid* Bus Trans Jakarta.

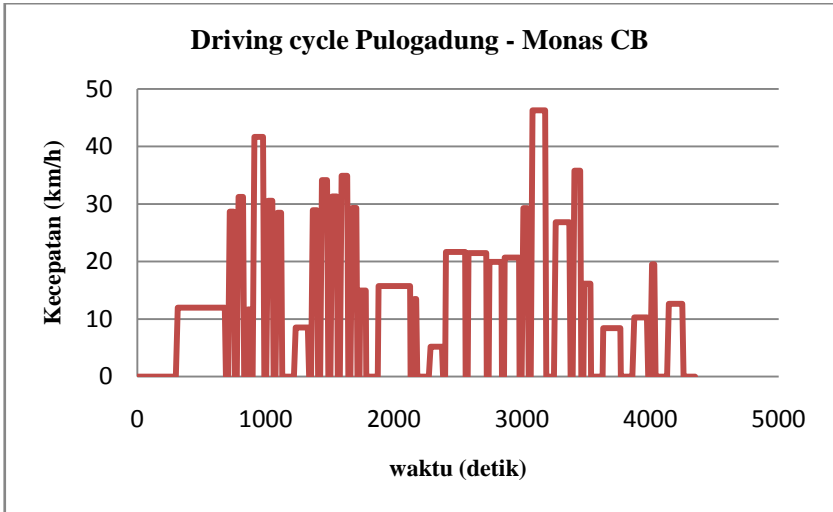
BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil dan Analisa Kebutuhan Daya Dorong.

4.1.1 Hasil kebutuhan daya dorong pada pemodelan dinamika kendaraan.

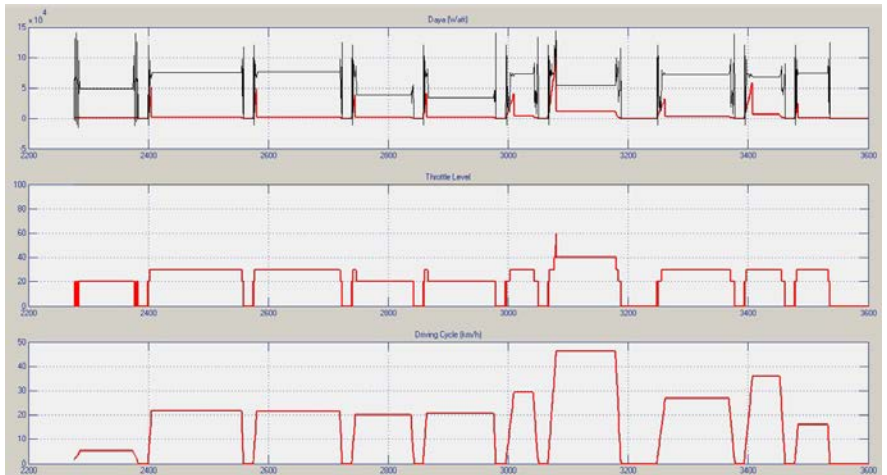
Flywheel hybrid system yang digunakan pada pemodelan dinamika ATC Bus Trans Jakarta digunakan sebagai *power boosting* agar kendaraan dapat berjalan sesuai dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Pada pemodelan ini akan dibandingkan massa *flywheel*, jumlah *charging* dan *discharging* dan konsumsi bahan bakar. Model yang dibandingkan diantaranya model dengan *throttle* 0-100 persen, model *throttle* 0-50 persen dan model *throttle* khusus.

Pada Tabel 2.1 tabel waktu tempuh dan kecepatan perjalanan halte pulogadung – halte monas terdapat data jarak antar halte, waktu untuk akselerasi, kecepatan maksimal, dan waktu perlambatan, dari data ini akan di olah menjadi *driving cycle* pulogadung – monas CB dengan mengasumsikan bahwa akselerasi Bus Trans Jakarta dianggap konstan maka *driving cycle* pulogadung – monas CB dapat digambarkan pada gambar 4.1



Gambar 4.1 *Driving Cycle* Pulogadung – Monas CB

Dari *driving cycle* diatas maka dapat dibuat Pemodelan dinamika kendaraan dengan interaksi pengemudi. Pada pemodelan dinamika kendaraan akan disimulasikan dengan massa kosong kendaraan untuk melihat dinamika ATC Bus Trans Jakarta pada *driving cycle* Pulogadung – Monas CB saat massa paling ringan. Berikut hasil pemodelan dinamika kendaraan dengan massa kosong

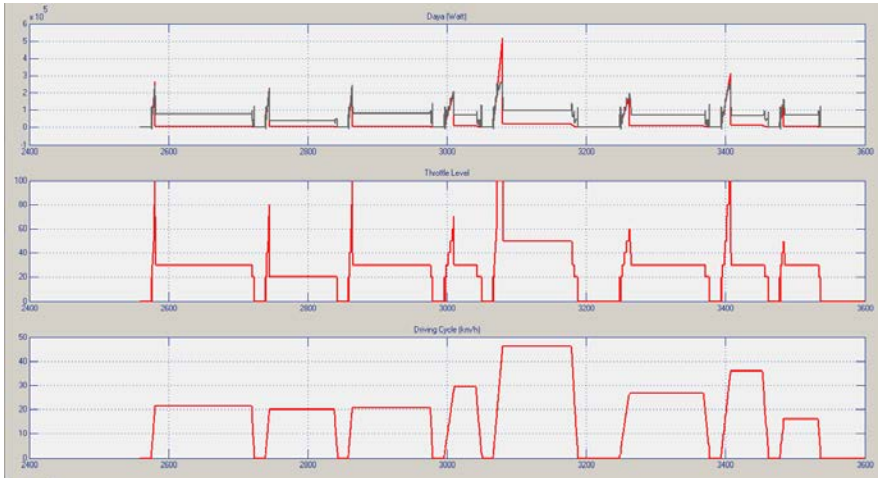


Gambar 4.2 Grafik Kebutuhan Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* pada Massa Kosong

Pada pemodelan akan menghasilkan grafik peta daya. Grafik pada gambar 4.2 bagian atas adalah grafik daya dalam satuan watt dalam fungsi waktu. Dari grafik ini terdapat 2 grafik, grafik yang berwarna merah adalah grafik kebutuhan daya kendaraan untuk berjalan dengan *driving cycle* dan grafik yang berwarna abu-abu adalah grafik daya yang dihasilkan *engine* agar kendaraan dapat berjalan dengan *driving cycle* yang telah ditentukan. Pada gambar 4.2 bagian tengah adalah grafik adalah grafik *throttle level*. Pada grafik ini adalah hasil bagian interaksi pengemudi yang akan menghasilkan *throttle level* untuk mengatur daya yang keluar dari *engine* setiap saat agar *engine* menghasilkan daya untuk menggerakkan kendaraan. Pada gambar 4.2 bagian bawah adalah *driving cycle* pulogadung – monas CB. *Driving cycle* ditunjukkan agar dapat mengetahui kapan dibutuhkan daya saat berjalan dengan *driving cycle*.

Pada saat beroperasi ATC Bus Trans Jakarta tentunya dapat bekerja dengan massa *full* atau penuh, oleh karena itu diperlukan

simulasi dinamika kendaraan dengan massa penuh. Berikut hasil simulasi kendaraan dengan massa penuh.



Gambar 4.3 Grafik Kebutuhan Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* pada Massa Penuh

4.1.2 Analisa kebutuhan daya dorong pada dinamika kendaraan

Dari grafik pada gambar 4.2 pemodelan dinamika kendaraan dengan massa kosong, dapat dilihat bahwa grafik daya *engine* selalu berada diatas grafik daya *driving cycle*, ini artinya *engine* dapat memenuhi kebutuhan daya pada *driving cycle* Pulogadung – Monas CB atau Bus Trans Jakarta dapat berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Pada massa kosong ini juga *engine* hanya bekerja pada *throttle level* maksimal pada 60 persen.

Pada gambar 4.3 hasil pemodelan dinamika kendaraan dengan massa penuh, grafik daya *engine* pada awalnya akan selalu lebih tinggi dari pada daya *driving cycle*. Namun ada beberapa kali kebutuhan daya *driving cycle* lebih besar dari pada daya yang dihasilkan oleh *engine* padahal *engine* sudah mencapai

throttle level 100 persen, ini akan menyebabkan kendaraan Bus Tran Jakarta tidak dapat berjalan dengan *driving cycle* yang telah ditentukan. Karena *Flywheel hybrid* ini adalah sebuah *hybrid* yang digunakan sebagai power boosting, maka untuk sistem ini agar dapat bekerja, daya *driving cycle* harus lebih besar dari pada daya *engine*. Oleh karena itu digunakan ATC bus trans Jakarta dengan massa penuh.

Pada grafik *throttle level* yang digunakan sebagai pengatur daya yang keluar dari *engine* ini memiliki kebiasaan untuk naik pada saat percepatan dan turun pada saat kecepatan konstan. Ini akan berbeda dengan kenyataan pada saat pengemudi berkendara, saat percepatan *throttle* akan naik dan pada saat kecepatan konstan akan mempertahankan posisi *throttle*. Pada simulasi pemodelan ini disebabkan oleh oleh pada *throttle level logic* akan mengurangi *throttle* jika daya lebih besar dari pada batas atas *throttle* dan pada pemodelan *throttle* hanya akan mempengaruhi daya yang dihasilkan kendaraan dan tidak mempengaruhi putaran *engine*, ini disebabkan oleh pada putaran *engine* ini akan selalu mengikuti *driving cycle* yang ditentukan.

4.2 Perancangan Flywheel Hybrid

Pada grafik peta daya, kebutuhan daya *driving cycle* dan daya yang dihasilkan *engine* pada 3050 detik daya kebutuhan daya *driving cycle* akan lebih besar dari pada daya yang dihasilkan oleh *engine* ini akan menyebabkan kendaraan tidak mampu berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Agar Bus trans Jakarta dapat beroperasi dengan dengan *driving cycle* yang telah ditentukan maka diperlukan sebuah *Flywheel hybrid* yang dapat membantu *engine* memenuhi kebutuhan daya dari *driving cycle*.

Dasar perancangan *Flywheel hybrid* adalah *flywheel* dapat memenuhi kekurangan daya yang dihasilkan oleh *engine* untuk memenuhi daya *driving cycle*. Untuk itu perlu dicari berapa *energy* yang yang harus disimpan oleh *flywheel*. Jumlah *energy* yang perlu disimpan oleh *flywheel* dapat dicari dengan cara

menghitung selisih daya *driving cycle* dan daya *engine* pada saat daya *driving cycle* lebih besar dari pada daya *engine*, kemudian selisih daya ini di integralkan sekali terhadap waktu untuk mendapatkan total energy yang harus disimpan *flywheel*. Berikut grafik daya *driving cycle* dan daya *engine* pada saat daya *driving cycle* maksimal dan daya *driving cycle* lebih besar daripada daya *engine*.



Gambar 4.4 Daya *Driving Cycle* Maksimal dan Daya *Engine* Maksimal pada 3050 detik.

Pada gambar 4.4 dapat dilihat daya maksimal *driving cycle* dan daya maksimal *engine* pada 3050 detik. Pada grafik diatas dapat dilihat daya terbesar *driving cycle* sebesar 519.6 kW dan daya terbesar *engine* hanya 260 kW. Dari grafik diatas akan dicari luasan grafik daya *driving cycle* dan daya *engine* pada saat terjadi potongan. Kemudian dari kedua luasan tersebut akan dikurangi untuk mendapatkan luasan antara daya *driving cycle* dan daya *engine*. Dari luasan diantara daya *driving cycle* dan daya *engine* akan didapatkan total *energy* yang harus disimpan oleh *flywheel*. Dengan menggunakan persamaan 3.13.

$$E_{flywheel} = \int_{t_1}^{t_2} P_d(t) - P_e(t) dt \quad (3.13)$$

Dimana nilai t_1 dan t_2 yang dapat dilihat pada gambar.

$$t_1 = 3072$$

$$t_2 = 3080$$

$$E_{flywheel} = \int_{3072}^{3080} P_d(t) - P_e(t) dt$$

$$E_{flywheel} = 1,058,875.1172 \text{ Joule}$$

Dengan menggunakan blok diagram pada matlab simulink didapatkan Total *energy* yang harus disimpan *flywheel* 1058875.11727982 joule. Untuk mengantisipasi kehilangan energi akibat gesekan maka energi total ini akan dikalikan 1.5.

Dengan mengetahui jumlah *energy* yang harus disimpan oleh *flywheel* dan putaran operasi *flywheel* yang dibatasi oleh kekuatan material *flywheel*. Maka dapat ditentukan dimensi dari *flywheel* dengan menggunakan persamaan (2.1)

$$E = \frac{1}{2} I (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \text{putaran maksimal operasi } flywheel = 16000 \text{ RPM} \\ &= 1675 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \text{putaran minimal operasi } flywheel = 8000 \text{ RPM} \\ &= 837.73 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1058875.11727982 \text{ joule} * 1.5 &= \frac{1}{2} I (1675^2 - 837.73^2) \\ I &= 1.609318 \text{ kg m}^2 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan (2.4)

$$I = \frac{1}{2} \rho \pi h (r_o^4 - r_i^4)$$

Pada Bus trans Jakarta yang memiliki dimensi panjang 17.6 m, lebar 2 m dan tinggi 3 m. pada samping bagian *engine* terdapat ruangan yang dapat menyimpan sebuah *flywheel* dengan tinggi 0.25 m, lebar 0.3 m dan panjang 0.1 m. dengan ruang yang kosong ini maka dirancang diameter *flywheel* seperti berikut.

Dimana:

r_o = radius luar *flywheel* = 0.15 m

r_i = radius dalam *flywheel* = 0.08 m

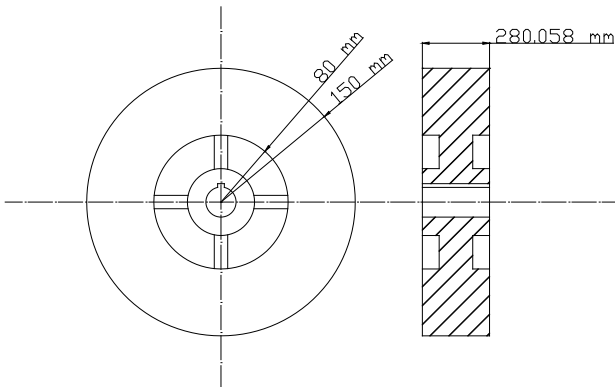
h = panjang *flywheel*

$$1.609318 \text{ kg m}^2 = \frac{1}{2} 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \pi h (0.15^4 - 0.08^4) \text{m}^4$$

$$1.609318 \text{ kg m}^2 = 5.73 \text{ Kg m}^3 h$$

$$h = 0.2805 \text{ m}$$

$$h = 28.058 \text{ cm}$$



Gambar 4.5 Dimensi *Flywheel Hybrid*

Maka massa total *flywheel* adalah

$$\begin{aligned}
 m &= V \rho \\
 m &= (h \pi (r_o^2 - r_i^2)) \rho \\
 m &= (0.2805 * \pi * (0.15^2 - 0.08^2)) * 7850 \\
 m &= 111.3494 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

Pada *Flywheel hybrid* dipilih materialnya adalah AISI 4340 yang memiliki *mechanical properties* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{yield}} &= 470 \text{ MPa} \\
 \nu &= 0.3 \\
 \rho &= \text{massa jenis baja} = 7850 \text{ Kg/m}^3
 \end{aligned}$$

dengan mengetahui properties material yang digunakan oleh *flywheel hybrid*, dimensi *Flywheel hybrid* dan putaran operasi dari *flywheel*, perlu diketahui apakah *flywheel* akan mengalami *failure* atau kerusakan akibat pengoperasian. Karena *flywheel* diputar dengan putaran yang sangat tinggi maka *flywheel* akan terjadi kerusakan pada arah tangensial dan radial yang dituliskan pada persamaan (2.8) dan (2.9).

tegangan tangensial

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &= \frac{(3 + \nu) \rho \omega^2}{8} \left[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right] \\
 \sigma_t &= \frac{(3 + 0.3) * 7850 * 1675^2}{8} \left[0.08^2 + 0.15^2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{0.08^2 * 0.15^2}{0.08^2} - \frac{1 + 3 * 0.3}{3 + 0.3} * 0.08^2 \right] \\
 \sigma_t &= 451,109,780.6 \text{ Pa} \\
 \sigma_t &= 451.109 \text{ MPa} \\
 \sigma_{\text{yield}} &> \sigma_t \quad \text{jadi Flywheel aman}
 \end{aligned}$$

Tegangan radial

$$\sigma_r = \frac{(3 + \nu) \rho \omega^2}{8} \left[r_i^2 + r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - r^2 \right]$$

$$\sigma_t = \frac{(3 + 0.3) * 7850 * 1675^2}{8} \left[0.08^2 + 0.1^2 + \frac{0.08^2 * 0.1^2}{0.08^2} - 0.08^2 \right]$$

$$\sigma_t = 44,516,326 Pa$$

$$\sigma_t = 44.516 MPa$$

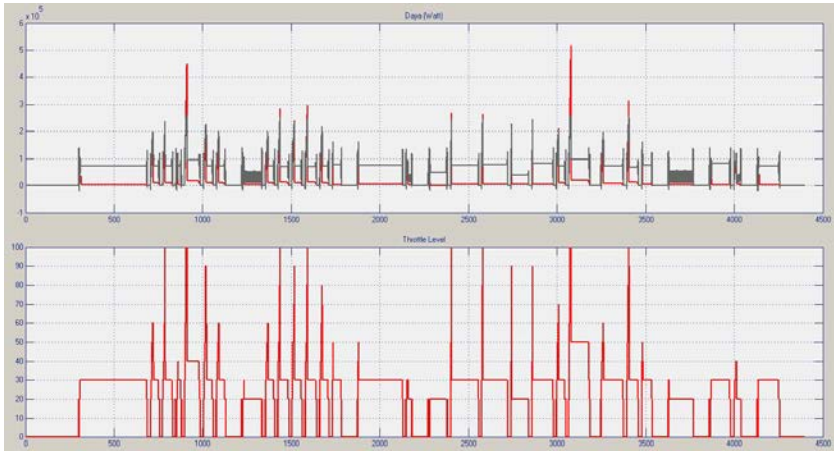
$$\sigma_{yield} > \sigma_r \quad \text{jadi Flywheel aman}$$

4.3 Hasil dan Analisa Flywheel Hybrid sebagai Penyimpan Daya.

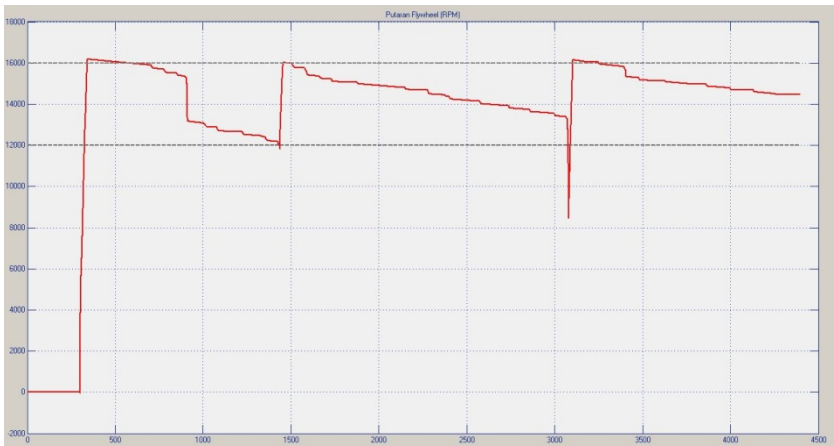
4.3.1.1 Hasil *flywheel hybrid* sebagai penyimpanan daya pada *throttle 0-100* persen.

Pada pemodelan dinamika kendaraan ke arah longitudinal dengan hybrid *flywheel* sistem ini akan digunakan sebuah *flywheel* yang telah dirancang sebelumnya yang dirancang dari selisih terbesar antara daya *engine* dan daya *driving cycle*. Pada pemodelan ini *throttle level* tidak akan diberi batasan atau *throttle* dapat mencapai *throttle* 100 persen. Dengan *throttle level* dapat mencapai 100 persen maka *engine* dapat menghasilkan daya sebesar 260 kW.

Flywheel hybrid ini untuk dapat membantu kinerja *engine* dalam menghasilkan daya harus memiliki energi yang disimpan dalam *flywheel hybrid*. Energi yang disimpan pada *Flywheel hybrid* ini disimpan dalam bentuk putaran sudut. Pada keadaan awal *Flywheel hybrid* dalam keadaan diam. Untuk memutar *Flywheel hybrid* ini digunakan daya sisa dari *engine* yang digunakan untuk menggerakkan kendaraan pada *driving cycle*. Daya sisa dari *engine* akan perlahan memutar *flywheel* hingga putaran operasi maksimal. Saat *flywheel* berputar tentunya akan mengalami gesekan dengan udara dan gesekan antara benda yang akan mengakibatkan *Flywheel hybrid* melambat, oleh karena itu pada saat *flywheel* melambat hingga lebih kecil daripada putaran batas bawah maka *engine* akan diputar kembali oleh daya sisa *engine*. Pada saat daya *engine* lebih kecil dari pada daya *driving cycle* maka *flywheel* akan memberikan energi untuk membantu kinerja *engine* untuk menghasilkan daya. Saat *flywheel* memberikan energi kecepatan putaran *flywheel* mengecil. Berikut hasil simulasi *flywheel hybrid*.



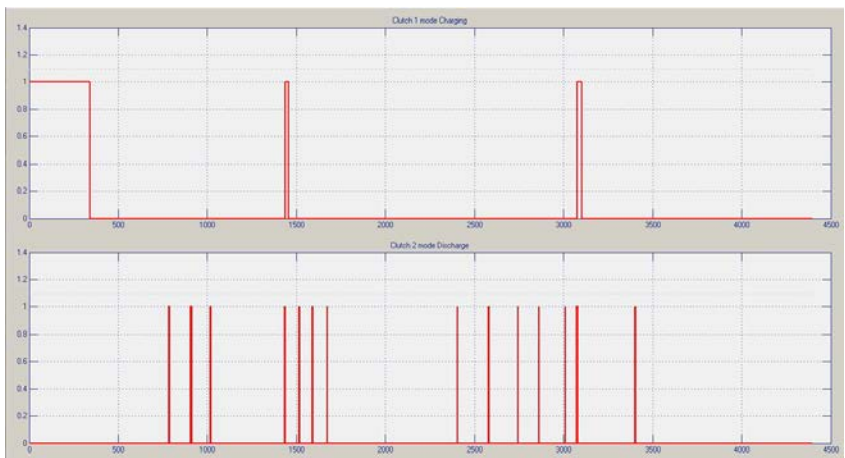
Gambar 4.6 Grafik Kebutuhan Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* dengan *Throttle* 0-100 Persen



Gambar 4.7 Putaran *Flywheel* Setiap Saat pada Pemodelan Dinamika Kendaraan dengan *Throttle* 0- 100 Persen

Pada grafik 4.6 bagian atas adalah grafik daya *driving cycle* dan daya *engine*, sedangkan gambar 4.6 bagian bawah adalah grafik *throttle level* setiap saat. Pada grafik 4.7 adalah

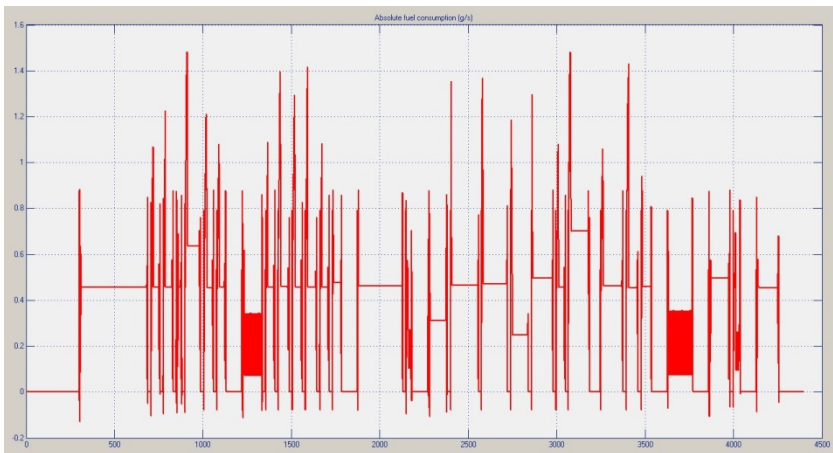
grafik putran *Flywheel hybrid* setiap saat. *Flywheel hybrid* yang pada awalnya dalam kondisi diam, kemudian pada saat *engine* menghasilkan daya berlebih pada saat kendaraan berjalan dengan *driving cycle* yang telah ditentukan maka *Flywheel hybrid* akan mulai berputar hingga mencapai putaran maksimal. Karena pada saat *flywheel* berputar akan mengalami kehilangan energi karena gesekan udara dan gesekan antar material, ini akan menyebabkan putaran *Flywheel hybrid* akan turun, *flywheel* akan terus turun putaran sudutnya hingga mencapai putaran batas bawah. Setelah itu *flywheel* akan *Charging* lagi dengan daya sisa *engine*. Pada saat daya dari *driving cycle* lebih besar dari pada daya dari *engine* maka *flywheel* akan membantu kerja *engine* dalam menghasilkan daya. *Flywheel* akan membantu *engine* dengan berkurangnya putaran *flywheel*. Setelah *flywheel Discharge* maka *flywheel* akan kehilangan energi dan putaran sudutnya akan berkurang.



Gambar 4.8 Grafik Operasi *Clutch 1* dan *2* pada *Flywheel Hybrid* Sistem pada Pemodelan *Throttle* 100 Persen

Pada *Flywheel hybrid system* digunakan 2 buah *Clutch* untuk menyimpan dan melepaskan energi pada *flywheel* hybrid. *Clutch 1* digunakan sebagai alat untuk menyimpan energi dari

engine ke *flywheel* atau disebut mode *Charging*. *Clutch 2* digunakan sebagai alat melepaskan energi dari *flywheel* ke kendaraan atau disebut sebagai mode *Discharge*. Pada grafik diatas dapat dilihat operasi *Clutch 1* dan *Clutch 2* pada *Flywheel hybrid system*. Dari grafik bagian atas penggunaan *Clutch 1* atau mode *Charging*, melakukan *Charging* sebanyak 2 kali dan *Clutch 2* atau mode *Discharge* akan malukan dicharging sebanyak 23 kali.



Gambar 4.9 Grafik Absolute Fuel Consumption pada Pemodelan Throttle 0-100 persen.

Pada pemodelan *flywheel* hybrid sebagai penyimpan daya pada throttle 0-100 persen akan menghasilkan konsumsi bahan bakar selama berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Pada gambar 4.9 dapat dilihat grafik *absolute fuel consumption* dalam g/s. untuk mencari nilai konsumsi bahan bakar total kendaraan perlu dicari luasan dibawah grafik, ini dapat dilakukan dengan mengintegalkan grafik sekali dengan menggunakan persamaan 3.10.

$$m = \int b_e dt \quad (3.10)$$

$$m = 1393.64 \text{ gram} = 1.39364 \text{ Kg.}$$

Dimana nilai massa jenis diesel adalah 815 Kg/cm^3 dan jarak total adalah 15.26 Km , maka untuk mencari konsumsi bahan bakar total digunakan persamaan 3.11.

$$\text{konsumsi bahan bakar} = \frac{S}{\frac{m}{\rho}}$$

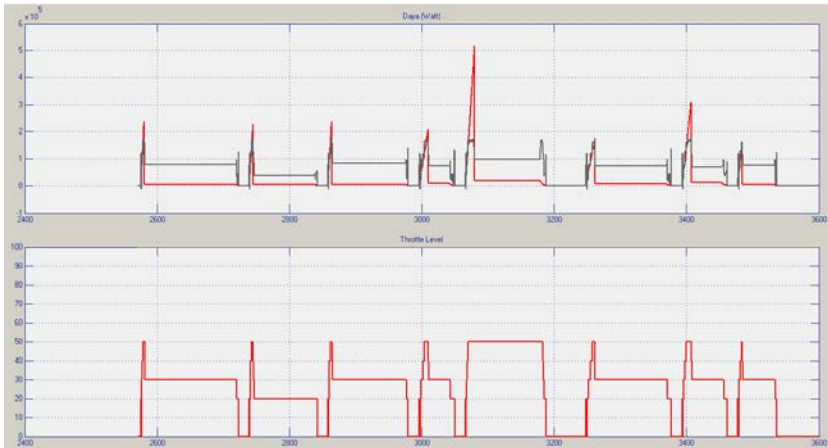
$$\text{konsumsi bahan bakar} = \frac{15.26 \text{ Km}}{\frac{1.3936 \text{ Kg} * 1000}{815 \text{ Kg/cm}^3}}$$

$$\text{konsumsi bahan bakar} = 8.924 \text{ Km/Liter}$$

Maka total konsumsi bahan bakar kendaraan adalah 8.924 Km/Liter

4.3.1.2 Hasil *flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya pada *throttle* 0-50 persen.

Pada pemodelan dinamika kendaraan ke arah longitudinal dengan hybrid *flywheel* sistem ini digunakan *engine* dengan *throttle* yang dibatasi pada 50 persen atau hanya dapat mencapai *throttle* 50 persen. Dengan *engine* yang bekerja dengan *throttle level* 0-50 persen hanya memiliki daya maksimal sebesar 173.6 kW . Dengan pemodelan dinamika kendaraan dengan *Flywheel hybrid* yang dibatasi dengan *throttle* 50 persen ini akan dilihat *Flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya saat ATC bus trans Jakarta berjalan pada *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Berikut hasil simulasi pemodelan *Flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya pada *throttle* 0-50 persen.



Gambar 4.10 Grafik Kebutuhan Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* pada *Throttle Level* 0-50 Persen

Pada grafik 4.10 dapat dilihat grafik daya *driving cycle* dan daya *engine*. Karena *engine* dibatasi *throttle* pada 50 persen maka dapat dilihat bahwa jumlah daya *driving cycle* yang lebih besar dari pada daya *engine* lebih banyak dari pada pemodelan dinamika kendaraan dengan *engine* yang tidak dibatasi. Ini akan menyebabkan *Flywheel hybrid* sistem akan banyak bekerja untuk membantu *engine* dalam menghasilkan daya. Ada satu masalah dalam pemodelan dinamika kendaraan dengan *engine* dibatasi pada 50 persen ini, masalahnya adalah saat daya *driving cycle* mencapai maksimal seperti pada gambar *engine* hanya dapat menghasilkan daya maksimal 176,3 kW. Oleh karena itu setelah dihitung, energi total yang harus disimpan oleh *Flywheel* dengan persamaan 3.13.

$$E_{flywheel} = \int_{t_1}^{t_2} P_d(t) - P_e(t) dt \quad (3.13)$$

$$E_{flywheel} = 1,689,000 \text{ Joule}$$

Dengan menggunakan blok diagram pada matlab simulink seperti pada gambar 3.17 didapatkan energi yang harus disimpan oleh flywheel sebesar 1.68 Mega Joule. Dengan pengoperasian

flywheel yang sama maka dapat dihitung inersia *flywheel* yang akan digunakan pada pemodelan *flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya pada *throttle* level 0-50 persen.

$$E = \frac{1}{2} I (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

$$1.68 \text{ MJ} * 1.5 = \frac{1}{2} I (1675^2 - 837.73^2)$$

$$I = 2.588 \text{ kg m}^2$$

Dengan menggunakan persamaan (2.4)

$$I = \frac{1}{2} \rho \pi h (r_o^4 - r_i^4)$$

$$2.588 \text{ kg m}^2 = \frac{1}{2} 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \pi h (0.15^4 - 0.08^4) \text{m}^4$$

$$2.588 \text{ kg m}^2 = 5.733 \text{ Kg m}^3 h$$

$$h = 0.4513 \text{ m}$$

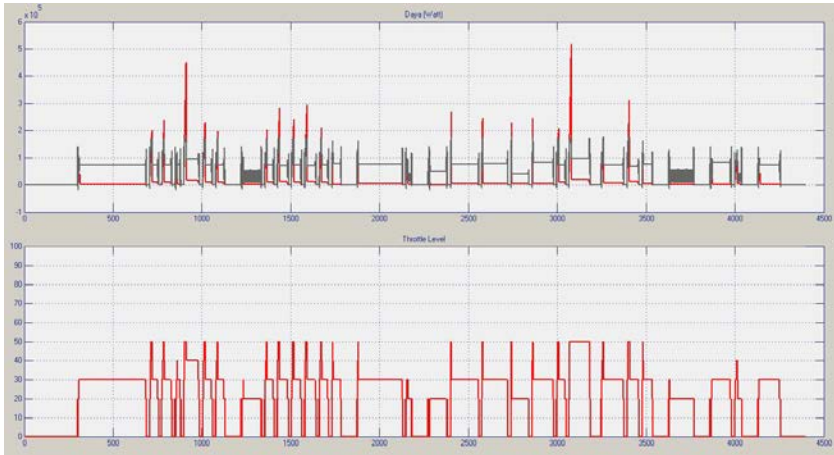
maka massa total *flywheel*

$$m = (h \pi (r_o^2 - r_i^2)) \rho$$

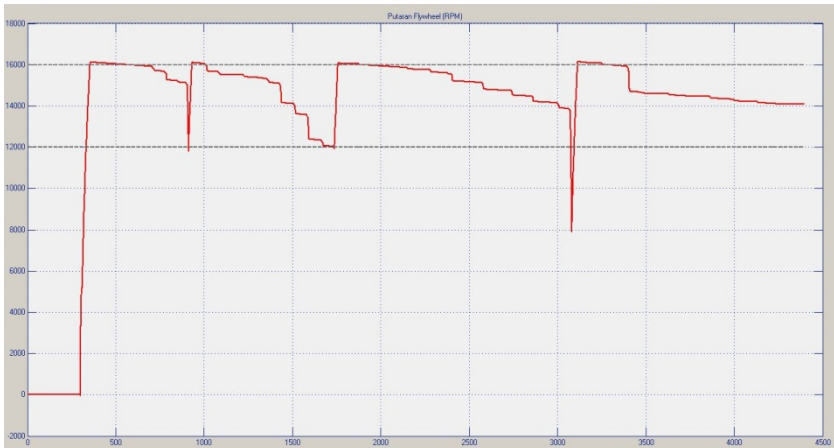
$$m = (0.4513 * \pi * (0.15^2 - 0.08^2)) * 7850$$

$$m = 179.1 \text{ Kg}$$

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa dengan *engine* dibatasi pada 50 persen *throttle* ini akan membutuhkan sebuah *flywheel* dengan massa 179.1 Kg. Berikut hasil simulasi pemodelan dinamika kendaraan dengan menggunakan *flywheel* yang baru saja dirancang.



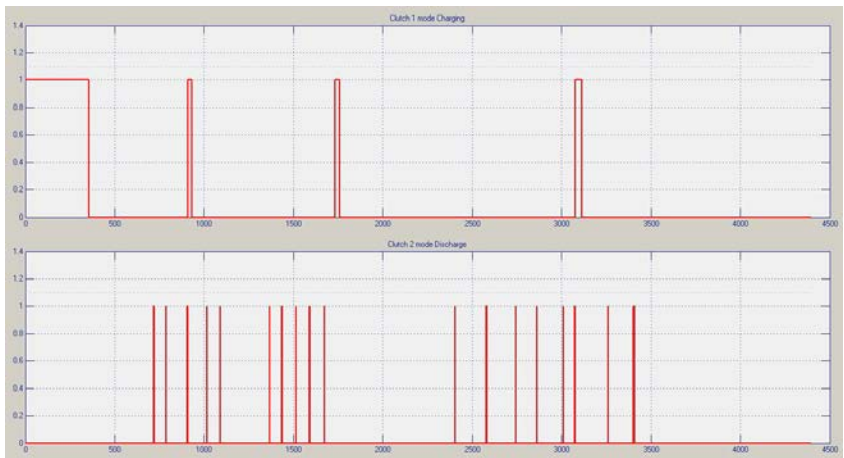
Gambar 4.11 Grafik Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* pada Pemodelan *Throttle 0-50* Persen.



Gambar 4.12 Putaran *Flywheel* Setiap Saat dengan Pemodelan *Throttle 0-50* Persen.

Pada gambar 4.12 dapat dilihat kebutuhan daya *driving cycle* dan daya yang dihasilkan oleh *engine* pada *throttle* maksimal 50 persen. Dapat dilihat juga putaran *flywheel* sebagai

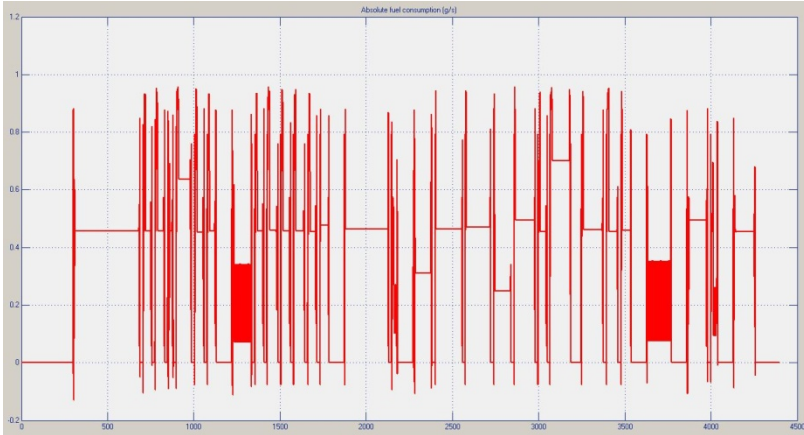
penyimpan daya dalam *Flywheel hybrid* sistem. Disini dapat dilihat bahwa dengan *flywheel* yang memiliki inersia sebesar 2.58 Kg m^2 ini akan menyebabkan *flywheel* akan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai putaran maksimal operasinya dari pada pemodelan dengan *throttle* 0-100 persen. Selain itu *flywheel* akan banyak melakukan pelepasan energi untuk memenuhi kebutuhan daya dorong kendaraan pada *driving cycle* Pulogadung – Monas CB.



Gambar 4.13 Grafik Operasi *Clutch* 1 dan 2 pada *Flywheel Hybrid* Sistem dengan *Throttle* Level 0-50 Persen

Pada *Flywheel hybrid system* digunakan 2 buah *Clutch* untuk menyimpan dan melepaskan energi pada *flywheel* hybrid. *Clutch* 1 di gunakan sebagai alat untuk menyimpan energi dari *engine* ke *Flywheel* atau disebut mode *Charging*. *Clutch* 2 digunakan sebagai alat melepaskan energi dari *flywheel* ke kendaraan atau disebut sebagai mode *Discharge*. Pada grafik di atas dapat dilihat operasi *Clutch* 1 dan *Clutch* 2 pada *Flywheel hybrid system*. Dari grafik di atas penggunaan *Clutch* 1 atau mode *Charging* akan melakukan *Charging* sebanyak 3 kali dan *Clutch*

2 atau mode *Discharge* akan melakukan discharging sebanyak 27 kali.



Gambar 4.14 Grafik Absolute Fuel Consumption pada Pemodelan Throttle 0-50 Persen.

Pada pemodelan *flywheel* hybrid sebagai penyimpan daya pada throttle 0-100 persen akan menghasilkan konsumsi bahan bakar selama berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Pada gambar 4.15 dapat dilihat grafik *absolute fuel consumption* dalam g/s. Untuk mencari nilai konsumsi bahan bakar total kendaraan perlu dicari luasan dibawah grafik, ini dapat dilakukan dengan mengintegtralkan grafik sekali dengan menggunakan persamaan 3.10.

$$m = \int b_e dt \quad (3.10)$$

$$m = 1371.3639 \text{ gram} = 1.37136 \text{ Kg.}$$

Dimana nilai massa jenis diesel adalah 815 Kg/cm^3 dan jarak total adalah 15.26 Km, maka untuk mencari konsumsi bahan bakar total digunakan persamaan 3.11.

$$\text{konsumsi bahan bakar} = \frac{S}{\frac{m}{\rho}}$$

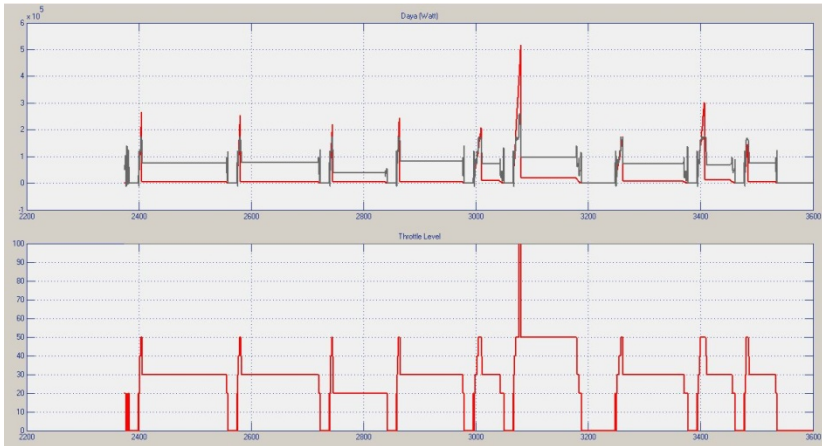
$$\text{konsumsi bahan bakar} = \frac{15.26 \text{ Km}}{1.37136 \text{ Kg} * 1000 / 815 \text{ Kg/cm}^3}$$

$$\text{konsumsi bahan bakar} = 9.069 \text{ Km/Liter}$$

Maka total konsumsi bahan bakar kendaraan adalah 9.069 Km/Liter

4.3.1.3 Hasil *flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya pada *throttle level khusus*

Pada pemodelan dinamika kendaraan dengan *throttle* 50 persen ini akan menyebabkan membutuhkan sebuah *flywheel* dengan inersia yang besar dan menyebabkan massa yang berat oleh karena dirancang sebuah pengoperasian *throttle level khusus*. *Throttle level khusus* ini akan digunakan sebuah *throttle* yang bekerja dengan yang bekerja pada maksimal 50 persen, namun dalam operasinya masih dapat mencapai 100 persen jika putaran *flywheel* sudah turun hingga 12000 RPM. Berikut hasil simulasi dinamika kendaraan dengan *throttle level khusus*.



Gambar 4.15 Grafik Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* pada *Throttle Level* Khusus.

Pada grafik 4.16 dapat dilihat daya *driving cycle* dan daya *engine* pada *throttle level* khusus dan *throttle level* setiap saat. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa *engine* dapat mencapai *throttle* 100 persen jika putaran *flywheel* mencapai 9000 RPM atau kebutuhan daya *driving cycle* sangat besar. Pada pemodelan ini pada saat kebutuhan daya *driving cycle* maksimal ini daya *engine* dapat menghasilkan daya sebesar 260 kW, namun masih kurang dari pada saat pemodelan *throttle level* 100 persen. Untuk mencari nilai energi yang harus disimpan *flywheel* digunakan persamaan 3.13.

$$E_{flywheel} = \int_{t_1}^{t_2} P_d(t) - P_e(t) dt \quad (3.13)$$

$$E_{flywheel} = 1,207,354 \text{ Joule}$$

Dengan menggunakan blok diagram pada matlab simulink seperti pada gambar 3.17 didapatkan energi total yang harus disimpan oleh *flywheel* sebesar 1.2 Mega Joule. Oleh karena itu perlu

dirancang sebuah *flywheel* yang baru untuk pemodelan *throttle level* khusus ini.

$$E = \frac{1}{2} I (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

$$1.23 \text{ MJ} * 1.5 = \frac{1}{2} I (1151.91^2 - 104.719^2)$$

$$I = 1.876 \text{ kg m}^2$$

Dengan menggunakan persamaan (2.4)

$$I = \frac{1}{2} \rho \pi h (r_o^4 - r_i^4)$$

$$1.876 \text{ kg m}^2 = \frac{1}{2} 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \pi h (0.15^4 - 0.08^4) \text{m}^4$$

$$1.876 \text{ kg m}^2 = 5.7344 \text{ Kg m}^3 h$$

$$h = 0.3271 \text{ m}$$

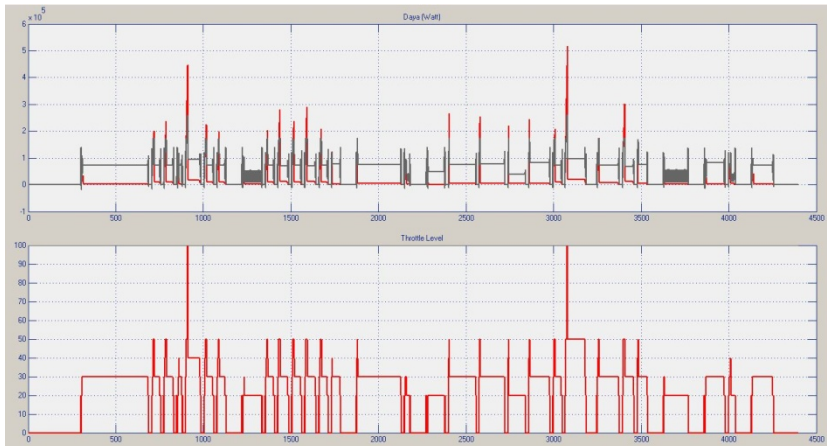
maka massa total *flywheel*

$$m = (h \pi (r_o^2 - r_i^2)) \rho$$

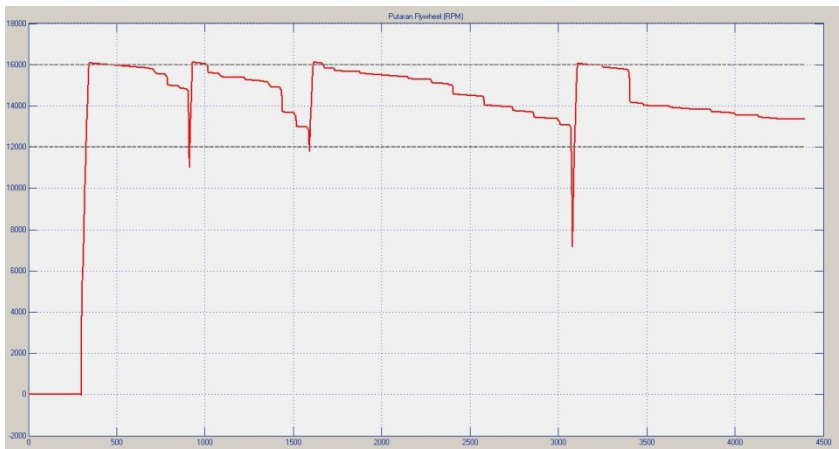
$$m = (0.3271 * \pi * (0.15^2 - 0.08^2)) * 7850$$

$$m = 129.82 \text{ Kg}$$

Dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa pada pemodelan dengan *throttle level* khusus diperlukan sebuah *flywheel* yang memiliki inersia sebesar 1.876 Kg m² dan massa 129.86 Kg. berikut hasil simulasi pemodelan dinamika kendaraan dengan menggunakan *flywheel* yang baru saja dirancang.



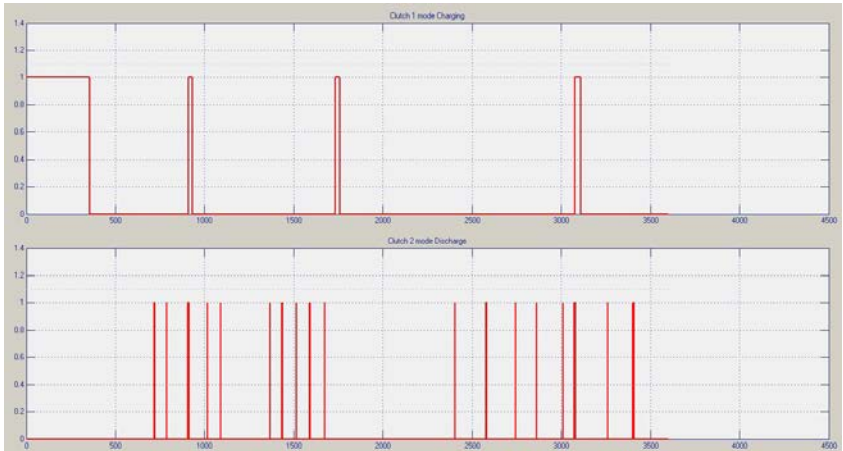
Gambar 4.16 Grafik Daya *Driving Cycle* dan Daya *Engine* pada *Throttle Level* Khusus.



Gambar 4.17 Putaran *Flywheel* Setiap Saat, pada *Throttle Level* Khusus

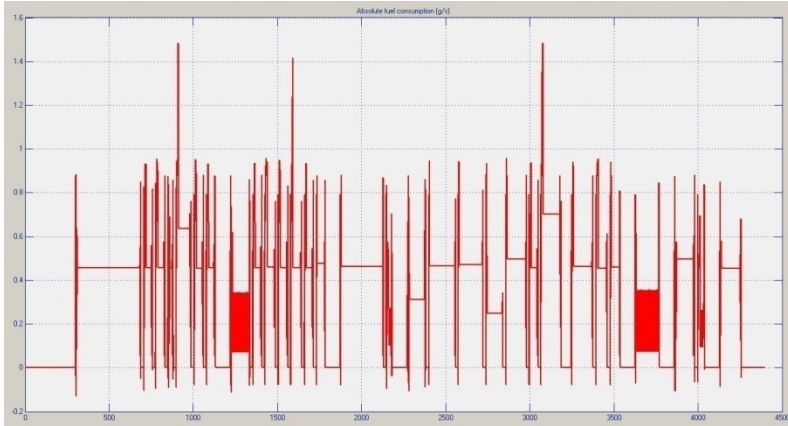
Pada gambar 4.18 dapat dilihat putaran *flywheel* setiap saat. Dengan menggunakan sebuah *flywheel* dengan inersia 1.8 kg m^2 ini dapat membantu *engine* dalam memenuhi kebutuhan daya

kendaraan pada saat kendaran berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Karena *engine* dapat mencapai 260 kW maka hanya dibutuhkan *flywheel* yang tidak terlalu besar.



Gambar 4.18 Grafik Operasi *Clutch* 1 dan 2 pada *Flywheel Hybrid* Sistem dengan *Throttle Level* Khusus.

Pada *Flywheel hybrid system* digunakan 2 buah *Clutch* untuk menyimpan dan melepaskan energi pada *flywheel hybrid*. *Clutch* 1 digunakan sebagai alat untuk menyimpan energi dari *engine* ke *Flywheel* atau disebut mode *Charging*. *Clutch* 2 digunakan sebagai alat melepaskan energi dari *flywheel* ke kendaraan atau disebut sebagai mode *Discharge*. Pada grafik diatas dapat dilihat operasi *Clutch* 1 dan *Clutch* 2 pada *Flywheel hybrid system*. Dari grafik diatas penggunaan *Clutch* 1 atau mode *Charging* akan melakukan *Charging* sebanyak 3 kali dan *Clutch* 2 atau mode *Discharge* akan melakukan *discharging* sebanyak 28 kali.



Gambar 4.19 Grafik *Absolute Fuel Consumption* pada *Throttle Level Khusus*.

Pada pemodelan *flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya pada *throttle khusus* akan menghasilkan konsumsi bahan bakar selama berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Pada gambar 4.16 dapat dilihat grafik *absolute fuel consumption* dalam g/s. untuk mencari nilai konsumsi bahan bakar total kendaraan perlu dicari luasan dibawah grafik, ini dapat dilakukan dengan mengintegrasikan grafik sekali dengan menggunakan persamaan 3.10.

$$m = \int b_e dt \quad (3.10)$$

$$m = 1375.611 \text{ gram} = 1.3756 \text{ Kg.}$$

Dimana nilai massa jenis diesel adalah 815 Kg/cm^3 dan jarak total adalah 15.26 Km, maka untuk mencari konsumsi bahan bakar total digunakan persamaan 3.11.

$$\text{konsumsi bahan bakar} = \frac{S}{m/\rho}$$

$$\text{konsumsi bahan bakar} = \frac{15.26 \text{ Km}}{1.3756 \text{ Kg} * 1000 / 815 \text{ Kg/cm}^3}$$

$$\text{konsumsi bahan bakar} = 9.041 \text{ Km/Liter}$$

Maka total konsumsi bahan bakar kendaraan adalah 9.041 Km/Liter

4.3.2 Analisa *flywheel hybrid* sebagai penyimpan daya

Dari hasil simulasi dinamika kendaraan dengan *throttle level* 100 persen, 50 persen dan khusus ini memiliki beberapa perbedaan diantaranya pada jenis *flywheel* yang digunakan, jumlah *Charging* dan *Discharge* pada saat kendaraan beroperasi dan konsumsi bahan bakar yang diperlukan deengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB. Berikut hasil simulasi pemodelan dinamika kendaraan dengan dengan *throttle level* 0-100 persen, 0-50 persen dan khusus.

Tabel 4.1 Tabel Hasil Simulasi Pemodelan Dinamika Kendaraan

Jenis	Massa <i>Flywheel</i>	<i>Charging</i>	<i>Discharge</i>	Konsumsi bahan bakar
<i>Throttle</i> 0-100 %	111.34 Kg	2	23	8.924 Km/Liter
<i>Throttle</i> 0-50 %	179.10 Kg	3	29	9.069 Km/Liter
<i>Throttle</i> Khusus	129.82 Kg	2	28	9.041 Km/Liter

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa pemodelan dengan *throttle* 100 persen ini hanya membutuhkan sebuah *flywheel* dengan massa 111.34 Kg yang lebih ringan dari pada pemodelan dengan *throttle* 50 persen yang membutuhkan *flywheel* dengan massa 179.10 Kg. untuk pemodelan dengan *throttle* khusus ini memiliki sebuah *flywheel* dengan massa 129.82 Kg yang massa lebih berat dari pada pemodelan *throttle* 100 persen namun lebih ringan dari pada *throttle* 50 persen. Besar kecil *flywheel* yang digunakan pada pemodelan ini tentunya dipengaruhi oleh selisih daya antara daya *engine* dan daya *driving cycle*.

Pada pemodelan dengan *throttle* 100 persen ini akan memiliki jumlah mode *Charging* sebanyak 2 kali dan mode discharge sebanyak 23 kali, ini jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan pada pemodelan *throttle* 50 persen yang memiliki mode *Charging* sebanyak 3 kali dan mode discharge sebanyak 29 kali. Pada pemodelan dengan *throttle* khusus ini memiliki mode *Charging* 2 kali dan mode discharge sebanyak 28 kali yang lebih banyak dari pada pemodelan 100 persen namun lebih sedikit daripada pemodelan *throttle* 50 persen. Banyaknya jumlah mode *Charging* ini akan disebabkan oleh berapa kali putaran *flywheel* turun hingga lebih kecil dari pada putaran maksimal operasi. *Flywheel* dapat turun putaranya karena 2 hal yaitu *Discharge* dan gesekan udara dan komponen yang akan memperlambat putaran *flywheel*. Banyaknya jumlah *Discharge* pada pemodelan ini akan disebabkan oleh banyaknya daya *driving cycle* lebih besar dari pada daya yang dihasilkan oleh *engine*.

Pada pemodelan *throttle* 100 persen akan membutuhkan bahan bakar sebanyak 1.716 Liter atau 8.924 Km/Liter, ini jumlah yang lebih banyak dari pada pemodelan 50 persen yang membutuhkan bahan bakar 1.683 Liter atau 9.069 Km/Liter. Pada pemodelan dengan *throttle* khusus membutuhkan bahan bakar dengan jumlah 1.688 Liter atau 9.041 Km/Liter. Konsumsi bahan bakar ini tentunya dipengaruhi oleh putaran *engine* dan daya yang dihasilkan oleh *engine*.

Dari ketiga pemodelan dapat dilihat hasil dan kebutuhannya. Setiap pemodelan memiliki kekurangan dan kelebihan. Pada pemodelan *throttle* 100 persen ini memiliki sebuah *flywheel* yang ringan dan kerja actuator untuk mode *Charging* dan discharge tidak terlalu sering namun konsumsi bahan bakar besar dan penggunaan *Flywheel hybrid* tidak terlalu banyak. Pada pemodelan *throttle* 50 persen ini harus memiliki massa *flywheel* yang besar dan kerja actuator untuk *Charging* dan *Discharge* banyak namun memiliki konsumsi bahan bakar sedikit dan penggunaan *Flywheel hybrid* yang lebih banyak. Pada pemodelan dengan *throttle* khusus ini memiliki *flywheel* yang

tidak terlalu berat dan konsumsi bahan bakar yang tidak teralalu besar juga namun tetap memiliki actuator yang kerjanya cukup banyak untuk *Charging* dan *Discharge*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa dari pemodelan dinamika kendaraan ATC Bus Trans Jakarta kearah longitudinal dengan sistem *Flywheel hybrid* yang menyertakan interaksi pengemudi kendaraan pada *driving cycle* Pulogadung – Monas CB pada program matlab simulink dapat disimpulkan bahwa:

1. ATC Bus Trans Jakarta dengan massa penuh yang berjalan dengan *driving cycle* Pulogadung – Monas CB membutuhkan daya terbesar 519.6 kW pada saat akselerasi dan pada detik 3050.
2. Daya dorong kendaraan maksimum mampu dipenuhi oleh *engine* dan *flywheel* yang dirancang dengan radius dalam 100 mm, radius luar 200 mm dan tebal yang sesuai dengan kondisi bukaan *throttle* sebagai berikut:
 - a. Kondisi bukaan *throttle* 0-100 %, *flywheel* memiliki tebal 280.58 mm dan massa 111.34 Kg.
 - b. Kondisi bukaan *throttle* 0-50 %, *flywheel* memiliki tebal 450.13 mm dan massa 179.10 Kg.
 - c. Kondisi bukaan *throttle* khusus, *flywheel* memiliki tebal 327.10 mm dan massa 129.82 Kg.

Flywheel pada ketiga pilihan kondisi operasi tersebut memiliki batas putaran bawah 12000 RPM dan putaran atas 16000 RPM.

3. Ditinjau dari massa maka dipilih kondisi *throttle* 0-100 % namun dengan mempertimbangkan konsumsi bahan bakar dan jumlah charging dan discharging, maka dipilih kondisi bukaan *throttle* khusus. Pada kondisi *throttle* khusus ini memiliki *flywheel* dengan ketebalan 327.10 mm dan massa 129.82 Kg, jumlah charging sebanyak 2 kali dan jumlah discharging 28 kali serta memiliki konsumsi bahan bakar 9.041 Km/liter.

4. *Flywheel hybrid system* ini efektif digunakan pada saat ATC Bus Trans Jakarta bermassa penuh.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa saran untuk pengembangan beberapa saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya *friction losses* pada setiap komponen diperhatikan untuk mengetahui berapa energi yang hilang .
2. *Flywheel hybrid* digunakan sebagai sumber energi aksesoris kendaraan
3. Disarankan pada penelitian selanjutnya menambahkan perhitungan inersia setiap komponen yang bekerja pada sistem.
4. Disarankan pada penelitian selanjutnya dilakukan *Regenerative braking* pada *Flywheel hybrid system* .
5. Disarankan pada penelitian berikutnya menggabungkan *Flywheel hybrid system* dengan hybrid elektrikal agar sistem dapat bekerja dengan lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Cross, D. and J.Hilton.2010.**High speed *flywheel* based hybrid system s for low carbon vehicles.**
- Wang,B.H., Y.G.Luo, J.W.Zhang.2008.**Simulation of city bus performance based on actual urban cycle in china.**
- Naunhimer,Harald, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz, Wolfgang Novak.1994. **Automotive Transmissions Fundamentals, Selection, Design and Application.** Springer Heidelberg Dordrecht London.
- Marques, Maria Inês Lopes.2008. **Design and Control of an Electrical Machine for *Flywheel* Energy-Storage System .**
- Bender, Donald A.2000. ***Flywheel s for Renewable Energy and Power Quality Applications.*** Trinity *Flywheel* Power. San Francisco
- Trans Jakarta Sept 2013 <URL:http://www.transjakarta.co.id/tentangkami.php?page_id=3>
- the GYROBUS: Jan 1952 p37 **Something New Under the Sun?.***Motor Trend.*

BIODATA PENULIS



Hadid Bismara Tedji dilahirkan di Pekanbaru, 25 Agustus 1991. Anak ke tiga dari Lukman Tedji dan Erna Swadesi. Hadid menyelesaikan masa studi sekolah dasar di SDIT AL-ITTIHAD rumbai pada tahun 2003, dilanjutkan ke SMPIT AL-ITTIHAD rumbai lulus pada tahun 2006 dan SMA CENDANA rumbai lulus pada tahun 2009.

Selepas SMA penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Mesin pada tahun ajaran 2009/2010. Selama kuliah di ITS penulis aktif mengikuti organisasi Tennis Lapangan Universitas dan sering mengikuti lomba Tennis antar universitas. Di teknik mesin penulis memilih untuk mengerjakan tugas akhir dengan topic design Otomotif. Pada tahun 2014 penulis menyelesaikan studi S1-nya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Data m-file pada matlab

transJKT.m:

```
clear all
clc
p =1.2
Cd =0.8
A =8.65
lc =1.5
r =0.478
g =9.81
is =2.
ig1= 3.43
ig2= 2.01
ig3= 1.42
ig4= 1.00
ig5= 0.83
ie =5.
m =27900
Cf =0.003;
%DATA TORSI ENGINE DENGAN VARIASI THROTTLE
T100=[1433.121019    1656.050955 1633.757962
1624.203822 1616.242038 1594.806467 1569.608735
1560.509554 1516.719745 1455.601349 1380.042463
1307.408649 1194.267516 887.1701547
];
T90=[1433.121019    1656.050955 1633.757962
1624.203822 1616.242038 1577.917443 1536.712744
1527.804264 1484.932206 1425.094734 1351.119417
1278.719431 1147.279942 861.3615684
];
T80=[1433.121019    1656.050955 1612.812347
1588.562985 1576.700949 1549.006905 1517.915034
1504.399541 1455.362237 1390.230031 1305.668917
1217.242535 1092.461105 816.1965423
];
```

```

T70=[1433.121019      1634.043634 1597.103136
1552.922149 1507.504042 1461.941095 1414.527633
1396.793049 1343.930238 1276.919746 1165.185552
1094.288744 974.9921687 729.0925635
];
T60=[1433.121019      1595.530821 1534.266291
1512.189765 1433.364499 1361.841859 1292.342522
1266.582662 1205.334613 1133.102846 1057.757097
959.0395733 830.1138143 622.6321449
];
T50=[1417.018536      1535.010686 1476.66585
1400.175708 1285.085413 1198.627819 1118.46371
1093.589897 1037.173212 971.8535952 859.4276415
774.6088861 669.5729352 490.36314
];
T40=[1417.018536      1430.475908 1261.973297
1115.049019 953.9287871 863.3875125 784.8043676
761.4685465 714.3033347 662.4293563 549.5378669
487.7167061 375.9005952 274.2162296
];
T30=[1315.036141      1144.380727 932.0798628
753.5491085 603.0016167 541.3586724 488.7404445
460.1906313 414.380608 370.437469 272.7030016
196.7260663 129.2158296 58.06931922
];
T20=[1154.011308      643.7141587 445.0943165
336.04217 217.4759929 168.3256588 136.2833932
91.85989459 60.20170759 43.58087871 -8.263727322
-53.27997629 -86.14388639 -103.2343453
];
T0=[-214.6997781      -242.0805383 -256.5837825
-269.8520456 -281.7302635 -284.4756746
-286.6650684 -289.4564176 -288.0859301
-283.2757116 -289.2304563 -303.2860189
-293.67234 -264.5380098
];
Te=[T0;T20;T30;T40;T50;T60;T70;T80;T90;T100];
Pct = [0 20 30 40 50 60 70 80 90 100];
% PUTARAN OPERASI ENGINE

```



```

NE= [800 900      1000      1100      1200      1300
1400      1500      1600      1700      1800      1900
2000      2100
];
NE2=[700      800 900 1000      1100      1200      1300
1400      1500      1600      1700      1800      1900
2000      2100
];
%SFC ENGINE DALAM VARIASI DAYA
P8=[226.601636 222.9855628 220.4023976
218.8521405 218.3347914 218.8503504 220.3988174
222.9801925 226.5944756 231.2416668 236.9217661
243.6347734 251.3806887 260.1595121 269.9712436
];
P10=[220.7811814      216.583092 213.4179107
211.2856374 210.1862722 210.1198151 211.086266
213.0856249 216.1178919 220.183067 225.2811501
231.4121413 238.5760405 246.7728478 256.0025631
];
P12=[216.8908395      212.110734 208.3635366
205.6492472 203.9678659 203.3193926 203.7038274
205.1211702 207.5714211 211.05458 215.570647
221.119622 227.7015051 235.3162962 243.9639954
];
P14=[214.9306106      209.568489 205.2392754
201.9429699 199.6795724 198.449083 198.2515016
199.0868283 200.955063 203.8562058 207.7902567
212.7572156 218.7570826 225.7898576 233.8555406
];
P16=[214.9004945      208.9563567 204.045127
200.1668054 197.3213918 195.5088862 194.7292887
194.9825993 196.2688179 198.5879446 201.9399793
206.3249221 211.7427729 218.1935318 225.6771987
];
P18=[216.8004912      210.2743374 204.7810915
200.3207537 196.893324 194.4988023 193.1371887
192.8084831 193.5126856 195.2497962 198.0198147
201.8227414 206.6585761 212.5273188 219.4289697
];

```

```
P20=[220.6306009    213.5224308 207.4471689
202.404815  198.3953691 195.4188313 193.4752015
192.5644798 192.6866662 193.8417606 196.0297631
199.2506736 203.5044921 208.7912188 215.1108534
];
P22=[226.3908234    218.7006372 212.0433591
206.4189891 201.8275271 198.2689731 195.7433272
194.2505894 193.7907596 194.3638379 195.9698242
198.6087186 202.2805211 206.9852316 212.7228501
];
P24=[234.0811587    225.8089564 218.5696622
212.363276  207.1897979 203.0492278 199.9415658
197.8668118 196.8249659 196.8160281 197.8399983
199.8968765 202.9866628 207.1093572 212.2649596
];
P26=[243.7016069    234.8473885 227.0260781
220.2376758 214.4821816 209.7595954 206.0699172
203.4131471 201.7892851 201.1983311 201.6402852
203.1151473 205.6229175 209.1635957 213.737182
];
Pbsfc=[P8;P10;P12;P14;P16;P18;P20;P22;P24;P26];
Pdy=[80000 100000 120000 140000 160000
180000 200000 220000 240000 260000
];
```

```
%FLYWHEEL
```

```
pf= 7850;           %massa jenis steel flywheel
kg/m^3
```

Torsi Engine

Throttle Level	Putaran engine (RPM)									
	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
0	- 215	- 242	- 257	- 270	- 282	- 284	- 287	- 289	- 288	- 283
20	115 4	644	445	336	217	168	136	92	60	44
30	131 5	114 4	932	754	603	541	489	460	414	370
40	141 7	143 0	126 2	111 5	954	863	785	761	714	662
50	141 7	153 5	147 7	140 0	128 5	119 9	111 8	109 4	103 7	972
60	143 3	159 6	153 4	151 2	143 3	136 2	129 2	126 7	120 5	113 3
70	143 3	163 4	159 7	155 3	150 8	146 2	141 5	139 7	134 4	127 7
80	143 3	165 6	161 3	158 9	157 7	154 9	151 8	150 4	145 5	139 0
90	143 3	165 6	163 4	162 4	161 6	157 8	153 7	152 8	148 5	142 5
100	143 3	165 6	163 4	162 4	161 6	159 5	157 0	156 1	151 7	145 6

RPM			
1800	1900	2000	2100
-289	-303	-294	-265
-8	-53	-86	-103
273	197	129	58
550	488	376	274
859	775	670	490
1058	959	830	623
1165	1094	975	729
1306	1217	1092	816

1351	1279	1147	861
1380	1307	1194	887

Seluruh data diatas dalam satuan Newton.

Sfc Engine

Daya engine (Watt)	Putaran Engine (RPM)								
	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
80000	227	223	220	219	218	219	220	223	227
100000	221	217	213	211	210	210	211	213	216
120000	217	212	208	206	204	203	204	205	208
140000	215	210	205	202	200	198	198	199	201
160000	215	209	204	200	197	196	195	195	196
180000	217	210	205	200	197	194	193	193	194
200000	221	214	207	202	198	195	193	193	193
220000	226	219	212	206	202	198	196	194	194
240000	234	226	219	212	207	203	200	198	197
260000	244	235	227	220	214	210	206	203	202

RPM					
1600	1700	1800	1900	2000	2100
231	237	244	251	260	270
220	225	231	239	247	256
211	216	221	228	235	244
204	208	213	219	226	234

199	202	206	212	218	226
195	198	202	207	213	219
194	196	199	204	209	215
194	196	199	202	207	213
197	198	200	203	207	212
201	202	203	206	209	214

Seluruh data diatas dalam satuan g/kWh